



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Magdalena Rucinski

Konstruktion und Auslegung eines Versuchstandes zur experimentellen Analyse am ebenen Schubfeldträger

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Magdalena Rucinski

**Konstruktion und Auslegung eines
Versuchstandes zur experimentellen
Analyse am ebenen Schubfeldträger**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Eckart Nast
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Claus Cordes

Abgabedatum: 26.11.2020

Zusammenfassung

Magdalena Rucinski

Thema der Masterthesis

Konstruktion und Auslegung eines Versuchstandes zur experimentellen Analyse am ebenen Schubfeldträger

Stichworte

Leichtbau, Effizienzsteigerung im Betrieb, Konzeptentwicklung, Steifen, Schubfeldträger, Konstruktion und Auslegung, Festigkeitsnachweis

Kurzzusammenfassung

In der Luftfahrtindustrie werden Strukturbauteile immer leichtbaugerechter konstruiert um Gewicht einzusparen. Dazu wird immer mehr leichtbaugerechtes Material wie Aluminium und kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff verwendet. Zur Vereinfachung von komplizierten Bauteilen und Konstruktionen werden Ersatzmodelle erstellt. Ein Biegetorsionskasten in den Tragflächen eines Flugzeugs wird vereinfacht als Schubfeldsystem dargestellt. Dabei handelt es sich um eine im Leichtbau oftmals verwendete modellhafte Idealisierung, bei der das strukturmechanische Verhalten durch die Schubfeldtheorie beschrieben wird. Dies beschreibt dünnwandige Hautfelder, die durch berandende Steifen (Gurte, Stringer, Pfosten, ...) verstärkt werden. Ein 2D-Schubfeldträger wurde bereits im Rahmen einer Bachelorarbeit aufgebaut. Er ist allerdings als Kragarm mit drei rechteckigen Hautfeldern gleicher Dicke ausgeführt und in seinem Aufbau nicht veränderbar. Ziel dieser Arbeit ist ein Konzept zur Erweiterung des Versuchstandes eines ebenen Schubfeldträgers, der einen flexiblen Aufbau bzgl. unterschiedlicher Hautfeld- und Steifengeometrien, Lagerungen und Lasteinleitungen erlaubt.

Title of the master thesis

Construction and design of a test bench for experimental analysis on a shear field beam

Keywords

Lightweight structure, increased efficiency in operation, concept development, stiffeners, Shear Field Structure, construction and design, proof of strength

Abstract

In the aviation industry, structural components are being designed to save weight. This is achieved by using lightweight materials such as aluminium and carbon fiber reinforced plastics. In order to make complicated components and constructions easier for understanding, they are simplified by replacement models. In this example is a shear field structure. It takes thin-walled skin fields, which are reinforced by bounding stiffeners. A 2D shear field structure has already been developed in the context of a bachelor thesis. However, it is designed as a cantilever with three rectangular skin fields of equal thickness and its structure cannot be changed. The aim of this thesis is to develop a concept for the extension of the 2D shear field beam, which has a flexible design with respect to different skin field and stiffener geometries, bearings and load introduction.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt haben. Ohne diese Unterstützung wäre es mir nicht möglich gewesen meine Masterarbeit in diesem Umfang anzufertigen.

Zuerst gebührt mein Dank dem Flugkapitän und Dipl.-Ing. Claus Cordes. Ihre Hilfsbereitschaft und die gemeinsame Analyse der entstandenen Fragen meinerseits, waren immer sehr förderlich und zielführend. Durch Ihr Engagement als Betreuer konnte ich sehr viel neues Erlernen, nicht nur für die Masterarbeit, sondern ebenso für meine Zukunft.

Anschließen möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich stets mental unterstützt haben und mit vollem Verständnis meine häufigen Abwesenheiten akzeptiert haben. Diesen Dank möchte ich nicht nur für den Zeitraum der Bearbeitung meine Masterthesis aussprechen, sondern für den gesamten Zeitraum meines Studiums.

Ein besonderer Dank geht an Prof. Dr. Eckart Nast für die hochschulseitige Betreuung, die intensiven und ebenso zielfördernden Gespräche und zahlreichen Analysen, während der gesamten Bearbeitungszeit der Masterarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Symbolverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Einfluss aerodynamischer Kräfte auf Schubbedarf und Treibstoffverbrauch	4
3 Bedeutung des Schubfeldträgers im Leichtbau	6
4 Konzeptentwicklung	7
4.1 Anforderungsanalyse.....	7
4.2 Lösungsfindung.....	8
4.2.1 Morphologischer Kasten.....	8
4.2.2 Nutzwertanalyse.....	14
4.2.3 Lösungsauswahl.....	16
5 Schubfeldträgermodell I	17
5.1 Berechnung der inneren Kräfte des Schubfeldträgermodells.....	17
5.1.1 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Kraftangriffspunkt F.....	21
5.1.2 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Knotenpunkt E.....	27
5.2 Dimensionierung der Bauteile.....	28
5.3 Stabilitätsnachweis.....	29
5.3.1 Euler-Knicken – Steife.....	29
5.3.2 Beulen der Hautfelder.....	32
6 Festigkeitsnachweis	37
6.1 Auslegung des Bolzens.....	37
6.2 Augenstab.....	39
6.3 Knotenscheibe.....	40
6.4 Verbindungsstück der Krafteinleitung und Lager.....	41
6.5 Welle-Nabe-Verbindung.....	41
6.5.1 Steife - Knotenscheibe.....	41
6.5.2 Befestigungselemente der Steifen – Stift.....	42
6.6 Festigkeitsnachweis Fertigungsverfahren - Kleben.....	42
7 Schubfeldträgermodell II	45
7.1 Berechnung der inneren Kräfte des Schubfeldträgermodells.....	45
7.1.1 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Lastangriffspunkt.....	47
7.1.2 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Knotenpunkt G.....	49
7.1.3 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Knotenpunkt E.....	50
7.1.4 Zusammenfassung der Verschiebung an den Knotenpunkten.....	52

7.2	Stabilitätsnachweis	52
7.2.1	Euler Knicken	52
7.2.2	Beulen	53
7.3	Festigkeitsnachweis	53
7.3.1	Bolzen	53
7.3.2	Augenstab.....	54
7.4	Zusatzteile	54
8	Schubfeldträger mit Störbelastung	55
9	Fertigung und Montage	56
9.1	Stückliste Schubfeldträger I	56
9.2	Stückliste Schubfeldträger II.....	57
9.3	Kostenanalyse	59
10	Zusammenfassung und Fazit	61
	Literaturverzeichnis.....	63
	Anhang A – Technische Zeichnungen	64
	Anhang B – Datenblatt – Bolzen aus Edelstahl X8CrNiS18-9.....	85
	Anhang C – Datenblatt – Kleber LOCTITE 3090	88
	Anhang D – Datenblatt - Ultrafuse PLA PRO1	90
	Anhang E – Erklärung zur Selbstständigen Bearbeitung der Arbeit	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Rumpfkonstruktion [5]	1
Abbildung 2 - Schubfeldträger Vorgänger-Modell.....	2
Abbildung 3 - Ablenkung der Stromlinien infolge Umströmung der Flügelenden [4]	4
Abbildung 4 - Aufrollen der Wirbelfläche hinter dem Tragflügel [4].....	5
Abbildung 5 - Statisch bestimmter Schubfeldträger [a) Durch Einzelkraft F belasteter Schubfeldträger, b) Freischnitt des Schubfeldträgers] [8].....	6
Abbildung 6 - Konzept 1.....	11
Abbildung 7 - Konzept 2.....	12
Abbildung 8 - Konzept 3.....	13
Abbildung 9 - Konzept 4.....	13
Abbildung 10 - Konzept 5.....	14
Abbildung 11 - Links: Schubfeldträger mit drei Hautfeldern; Rechts: Verbindung der Steifen ..	16
Abbildung 12 - SFT Modell 1 – 0-System– Links: Ebener SFT mit 3 Hautfeldern; Rechts: Freikörperbild.....	17
Abbildung 13 - Steife 5 - Schnitt 1	19
Abbildung 14 - Steife 9 - Schnitt 2	19
Abbildung 15 - Steife 8 - Schnitt 3	19
Abbildung 16 - Steife 2 - Schnitt 4	19
Abbildung 17 - Steife 7 - Schnitt 5	19
Abbildung 18 - Knoten B - Schnitt 6	19
Abbildung 19 - Knoten A - Schnitt 7.....	20
Abbildung 20 - Steife 3 - Schnitt 8	20
Abbildung 21 - Steife 10 - Schnitt 9	20
Abbildung 22 - Knoten G - Schnitt 10.....	20
Abbildung 23 - Steife 4 - Schnitt 11	20
Abbildung 24 - Freischnitt vom Schubfeldträgermodell I - 1-System am Knotenpunkt F.....	21
Abbildung 25 - Steife 5 - Schnitt 1	22

Abbildung 26 - Steife 2 - Schnitt 2	22
Abbildung 27 - Steife 9 - Schnitt 3	22
Abbildung 28 - Steife 8 - Schnitt 4	22
Abbildung 29 - Steife 10 - Schnitt 5	22
Abbildung 30 - Steife 7 - Schnitt 6	22
Abbildung 31 - Knoten B – Schnitt 7	23
Abbildung 32 - Knoten A - Schnitt 8	23
Abbildung 33 - Steife 3 - Schnitt 9	23
Abbildung 34 - Knoten G – Schnitt 10	23
Abbildung 35 - Steife 4 - Schnitt 11	23
Abbildung 36 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf.	25
Abbildung 37 - Koppeltafel zur Integration [1]	26
Abbildung 38 - Freischnitt vom Schubfeldträgermodell I - 1-System am Knotenpunkt E	27
Abbildung 39 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf.	28
Abbildung 40 - Konstruktion der Steifen.....	29
Abbildung 41 - Euler Knickfälle [8]	30
Abbildung 42 - Querschnitt Steife (Maße in mm)	31
Abbildung 43 - Quadratisches Hautfeld – Blech	32
Abbildung 44 - Diagramm zur Ermittlung des Beulwertes [8].....	34
Abbildung 45 - Trapez – Hautfeld	35
Abbildung 46 - Rechteck - Hautfeld	36
Abbildung 47 - Bolzen mit Einstich [12].....	37
Abbildung 48 - Augenstab	39
Abbildung 49 - Knotenscheiben-Konstruktion	40
Abbildung 50 - Verbindung der Knotenscheiben mit den Steifen.....	40
Abbildung 51 - Verbindungsstücke Links: Krafteinleitung; Rechts: Lager	41
Abbildung 52 - Verbindung Steife – Knotenscheibe	41
Abbildung 53 - Verbindung Befestigungselement Stift.....	42

Abbildung 54 - Überlappungslänge einer Klebeverbindung [6].....	43
Abbildung 55 - a) Ebener Schubfeldträger und b) Freikörperbild des Schubfeldträgers	45
Abbildung 56 - Schubfeldträger-Modell 2.....	45
Abbildung 57 - Freikörperbild 1-System (Lastangriffspunkt - Knoten H).....	47
Abbildung 58 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf. 48	
Abbildung 59 - Freikörperbild 1-System (Knotenpunkt G).....	49
Abbildung 60 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf. 50	
Abbildung 61 - Freikörperbild 1-System (Knotenpunkt E).....	50
Abbildung 62 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf. 51	
Abbildung 63 - Säule für die Lagerverlängerung	55
Abbildung 64 - Diskontinuierliches Schubfeldmodell. Links: Störkräfte bei Zugbelastung; Rechts: Störkräfte bei Schubbelastung [13].....	55
Abbildung 65 - Steifen aus dem 3D-Druck	62
Abbildung 66 - Teile aus dem 3D-Druck (Links: Knotenscheiben; Mitte: Verbindungsstück Lasteinleitung; Rechts: Verbindungsstück Lager	62
Abbildung 67 - Verbindung der Knotenscheibe und der Steifen.....	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Anforderungsanalyse	7
Tabelle 2 - Morphologischer Kasten	9
Tabelle 3 - Nutzwertanalyse.....	15
Tabelle 4 - Übersicht der erkennbaren Nullstäbe sowie Normalkräfte der Steifen	18
Tabelle 5 - Zusammenfassung der Steifenkräfte und Schubflüsse	21
Tabelle 6 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Knotenpunkt F.....	24
Tabelle 7 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Knotenpunkt E	27
Tabelle 8 - Materialkennwerte [12].....	29
Tabelle 9 - Größen zur Berechnung der Knicksicherheit.....	32
Tabelle 10 - Übersicht über die Sicherheitswerte bezüglich des Beulens.....	37
Tabelle 11 - Übersicht der Größen zur Bestimmung des geeigneten Bolzendurchmessers.....	39
Tabelle 12 - Toleranzabmessung Steife - Knotenscheibe mit Bolzen	42
Tabelle 13 - Toleranzabmessung Stift - Bohrung	42
Tabelle 14 - Übersicht der erkennbaren Nullstäbe sowie Normalkräfte der Steifen	46
Tabelle 15 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Lastangriffspunkt	48
Tabelle 16 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Knotenpunkt G	49
Tabelle 17 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Knotenpunkt E	51
Tabelle 18 - Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Verschiebung	52
Tabelle 19 - Größen zur Berechnung der Knicksicherheit.....	52
Tabelle 20 - Übersicht über die Sicherheitswerte bezüglich des Beulens.....	53
Tabelle 21 - Übersicht der Größen zur Bestimmung des geeigneten Bolzendurchmessers.....	53
Tabelle 22 - Übersicht der Größen zur Bestimmung der Scheitelhöhe und Wangenbreite	54
Tabelle 23 - Stückliste SFT I.....	56
Tabelle 24 - Stückliste SFT II	57
Tabelle 25 - Übersicht der bevorstehenden Kosten	60

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
F	N	Kraft
a	mm	Längenangabe Steife
b	mm	Längenangabe Steife
c	mm	Längenangabe Steife
q	N/mm	Schubfluss
q _{1m}	N/mm	Mittlerer Schubfluss
\bar{q}	1/mm	Virtueller Schubfluss
$\overline{q_m}$	1/mm	Virtueller mittlerer Schubfluss
U	[-]	Grad der statischen Bestimmtheit
N	N	Normalkraft der Steife
\bar{N}	[-]	Virtuelle Normalkraft der Steife
f	mm	Verschiebung
A	mm ²	Querschnittsfläche
A*	mm ²	Ersatzflächeninhalt Trapez/ Parallelogramm
α ₀	°	Winkel Trapez bis zur Grundlinie
α ₁	°	Winkel Trapez bis zur Trapezschräge
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
R _{p0,2} /R _e	N/mm ²	Streckgrenze
R _m	N/mm ²	Zugfestigkeit
l	mm	Steifenlänge für die Stabilitätsanalyse
s _K	mm	Eulersche Knicklänge
σ	N/mm ²	Normalspannung
τ	N/mm ²	Schubspannung

Symbol	Einheit	Bezeichnung
s	[-]	Sicherheitswert
I	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment
B _S	mm	Gesamtbreite Stab
B _N	mm	Breite Nut
B _B	mm	Breite Bohrung
H _S	mm	Höhe Stab
H _N	mm	Höhe Nut
H _B	mm	Höhe Bohrung
t	mm	Wandstärke Blech
k*	[-]	Beulwert
D ₁	mm	Durchmesser Bolzenmitte
D ₂	mm	Durchmesser Bolzenende
D ₃	mm	Durchmesser Bolzenkopf
M	mm	Breite Einstich
K	mm	Dicke Bolzenkopf
L	mm	Länge Bolzen
L ₁	mm	Länge Bolzen (bis zum Einstich)
M _b	Nmm	Biegemoment
a	mm	Scheitelhöhe
c	mm	Wangenbreite
s _M	[-]	Teilsicherheitsbeiwert
d _L	mm	Lochdurchmesser Bolzen
P _{SM}	μm	Mindest Spiel
P _{SH}	μm	Höchst Spiel
λ	mm	Überlappungslänge

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ü	[-]	Überlappungsverhältnis
v	[-]	Querkontraktion

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen	Bezeichnung
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
SFT	Schubfeldträger
FIL	Festigkeit im Leichtbau
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
k	Anzahl der Längs- und Quersteifen
m	Anzahl der Hautfelder
r	Anzahl Lagerreaktionen
o	Anzahl der Knoten
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
PvK	Prinzip der virtuellen Kräfte

1 Einleitung

In den letzten Jahren stiegen Konkurrenz und Kostendruck in der Luftfahrt permanent an. Dies wurde unter anderem durch den Anstieg der Treibstoffkosten ausgelöst. Der konsequente Einsatz von Teilen, die nach den Prinzipien des Leichtbaus konstruiert und hergestellt wurden, hilft die Masse der Flugzeuge zu reduzieren. Die Natur inspiriert die Menschheit seit Jahrhunderten zu neuen und innovativen Technologieansätzen. Diese Ansätze stellen eine Kombination aus Biologie und Technik dar und werden als Bionik bezeichnet. Diese natürlichen Vorbilder beeinflussen unter anderem durch Leichtbau die Konstruktionen, zum Beispiel mit dem Ziel den Luftwiderstand von Flugzeugen zu verringern. [11]

Leichtbaugerechte Bauteile sind Komponenten, bei denen die Struktur so aufgebaut ist, dass möglichst wenig Material eingesetzt wird, sodass die Anforderungen bezüglich der Steifigkeit und Festigkeit gerade noch erfüllt werden können. Dazu werden immer häufiger Konstruktionen mit dünnwandigen Profilen eingesetzt, die durch Steifen (Gurte, Stringer, Pfosten, etc.) verstärkt werden können.

Zur vereinfachten Darstellung der Verhältnisse an komplizierten Bauteilen und Konstruktionen werden diese durch Ersatzmodelle dargestellt. Deren Berechnung erfolgt mittels aufgestellter Theorien oder Prinzipien. Eine dieser Theorien ist die Schubfeldtheorie. Dabei handelt es sich um eine Idealisierung für dünnwandige Bauteile, wie zum Beispiel eines durch Stinger und Spanten versteiften Flugzeugrumpfes (Abbildung 1).

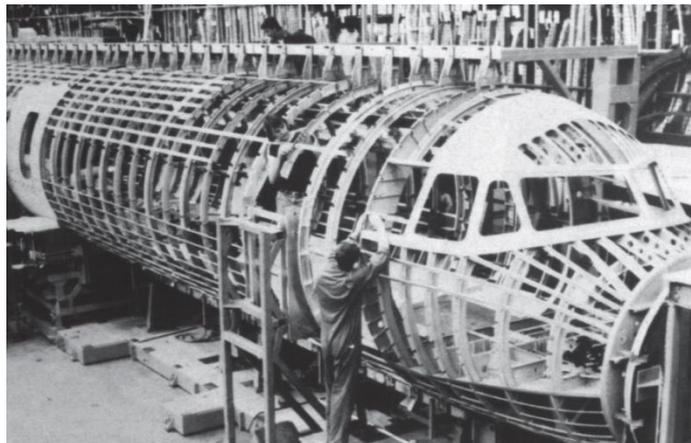


Abbildung 1 - Rumpfkonstruktion [5]

Um die Lehre in den Vorlesungen anschaulicher zu gestalten, gibt es für einige Lehrveranstaltungen, wie zum Beispiel Festigkeit im Leichtbau (FIL) an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW), Praxis-Labore. Diese werden unter anderem dazu genutzt, um theoretische und praktische Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

1.1 Motivation

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde bereits ein Modell zur experimentellen Spannungsanalyse konstruiert und berechnet (Siehe Abbildung 2). Bei diesem Modell werden drei Hautfelder {3} von Steifen umrandet {5}, wobei jedes Hautfeld in die Steifen eingeklebt wird. Eine gelenkige Lagerung wird durch die Knotenscheiben {3} am Ende jeder Steife ermöglicht.[12]

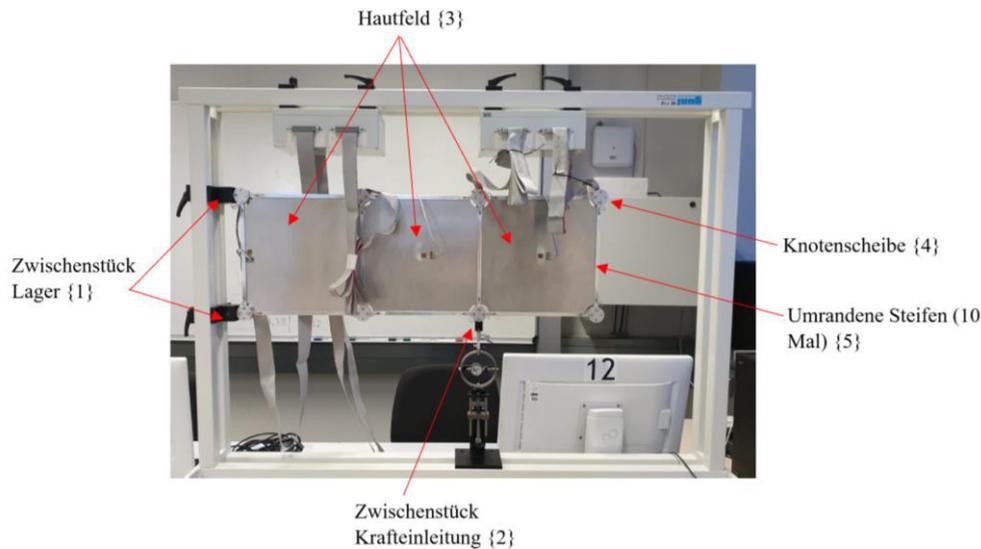


Abbildung 2 - Schubfeldträger Vorgänger-Modell

Durch das Drehen eines Ringkraftmessers {2} erfolgt die Lasteinleitung. Für die Verbindung des SFT Modells mit dem Teststand wurden im Rahmen der Bachelorarbeit Verbindungsstücke {1} und {2} konstruiert.[12]

Das Modell, welches als Kragarm ausgelegt wurde, ist jedoch in seinem Aufbau nicht veränderbar. Da in der Praxis neben rechteckigen Hautfeldern vielfach Hautfelder in Form von Trapezen oder Parallelogrammen vorkommen, werden für experimentelle Zwecke von Lehrveranstaltungen flexible Modelle gefordert, die im Aufbau veränderbar und nicht zwingend als ausgeführt werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Konzept für einen flexiblen Schubfeldträger zu erstellen. Dabei werden die Hautfeld- und Steifengeometrien neu ausgelegt und konstruiert. Zur Lagerung der Steifen müssen außerdem Knotenscheiben konstruiert werden, die eine gelenkige Lagerung der Steifen ermöglichen, sowie Verbindungsstücke, die die Verbindung mit dem Teststand ermöglichen.

Um umfangreiche und kostspielige Neukonstruktionen weitgehend zu vermeiden, sollen für die Konstruktion und Anbringung des Modells möglichst viele Standardkomponenten aus dem Bestand des Mechanik-Labors verwendet werden.

Die Lasteinleitungen in den Schubfeldträger sollen quasistatisch und rein mechanisch erfolgen. Im Rahmen des Konzeptentwurfs wird die Messung der Verformungen mit Messuhren vorgesehen.

Der Konzeptentwurf soll Zusammenbauzeichnungen, Stücklisten, Aufbau- und Versuchsvorschläge sowie Kostenschätzungen enthalten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung und dem Einstieg in das Thema wird zur Einordnung der Masterthesis eine aerodynamische Beziehung zum Thema Leichtbau und Gewichtsreduktion hergestellt. Mit Bezug zum Leichtbau wird dann die Schubfeldtheorie beschrieben.

Anschließend folgt die Konzeptentwicklung, die anhand unterschiedlicher Analysen durchgeführt wird. Nach der Auswahl eines geeigneten Konzepts werden mittels Regeln und Methoden des Leichtbaus zunächst die inneren Kräfte des Modells bestimmt und anschließend die Teile dimensioniert und auf Stabilität und Festigkeit überprüft. Dieser Teil, bildet den Kern dieser Arbeit, da abschließend zu den Berechnungen das Modell konstruiert werden kann.

Im siebten Kapitel wird in einer Kurzfassung ein weiteres Modell dimensioniert, berechnet und konstruiert um weitere Aufbau- und Versuchsvorschläge zu zeigen.

Die Vorbereitung zur Fertigung des Versuchsträgers wird mittels technischer Zeichnungen und Stücklisten, sowie einer Kostenanalyse durchgeführt. Abschließend werden Fehler und Auffälligkeiten formuliert, um am Ende ein prozesssicheres Modell zur Verfügung zu stellen.

2 Einfluss aerodynamischer Kräfte auf Schubbedarf und Treibstoff- verbrauch

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen aerodynamischen Lasten und Treibstoffeinsparung beschrieben. Geometrien, wie z.B der durch Stinger und Spanten versteifte Rumpf eines Flugzeuges, spielen eine wichtige Rolle für den Luftwiderstand. Wird der Widerstand verringert, wird zur Schuberzeugung weniger Kerosin verbrannt [11].

Während des Fluges werden bei einem Flugzeug große Luftmassen verdrängt. Auf einen angeströmten Tragflügel wirken Auftriebskraft und Widerstandskraft. Der Gesamtwiderstand ist die Summe von *auftriebsabhängigem* und *auftriebsunabhängigem* Widerstand.

Luftlasten entstehen durch die aerodynamische Druckverteilung auf der Flugzeugstruktur. Die dabei entstehende Druckverteilung wird durch die Flächenbelastung, die Flügelgeometrie, die Flughöhe und die Flugeschwindigkeit beeinflusst. Dabei treten *auftriebsabhängige* und *auftriebsunabhängige* Widerstände auf. [3][4]

Der auftriebsunabhängige Widerstand wird als schädlicher oder parasitärer Widerstand bezeichnet und entsteht durch Reibung der umströmten Luft an der Oberfläche aller Flugzeugteile (Reibungswiderstand), durch Interferenzen bei der Umströmung und durch Druckvariationen (Druckwiderstand). Im transsonischen Bereich treten örtliche Verdichtungsstöße (Schockwellen) auf, die den Gesamtwiderstand als Wellenwiderstand deutlich ansteigen lassen.

Der auftriebsabhängige Widerstand entsteht durch den induzierten Widerstand.

Im Folgenden wird nur auf den induzierten Widerstand eingegangen. Der *induzierte Widerstand*, der stark von der Flügelgeometrie abhängt, entsteht durch den Druckausgleich zwischen Flügelunter- und oberseite an den Flügelenden und verursacht den stärksten Anteil am auftriebsabhängigen Widerstand. Der Druckausgleich führt zur Ablenkung der Stromlinien an der Oberseite nach innen und auf der Unterseite nach außen (siehe Abbildung 3).[4]

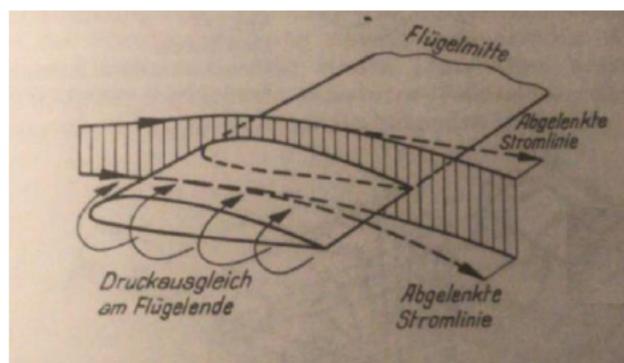


Abbildung 3 - Ablenkung der Stromlinien infolge Umströmung der Flügelenden [4]

Beim Auftreffen der Stromlinien an der Hinterkante des Profils, weisen diese, je nach Größe der Ablenkung, Geschwindigkeitskomponenten in Spannweitenrichtung auf, wodurch eine Drehbewegung eingeleitet wird. Aus diesem Grund lösen sich von der Tragflächenhinterkante Wirbel ab. Zur Aufrechterhaltung der Luftverwirbelungen an den Flügelenden, die als Wirbelzöpfe bezeichnet werden, muss kontinuierlich Arbeit vollbracht werden, um den induzierten Widerstand zu überwinden.

Die Hinterkantenwirbel verlassen die Flügelhinterkante nicht parallel zur Symmetrieebene, sondern drehen sich gegen die Flügelenden hinweg und führen somit dazu, dass sie sich in die Wirbelzöpfe einrollen. Die Randwirbel bilden mit dem bei Bewegungenbeginn entstehenden Anfahrwirbel und dem Tragflügel einen

geschlossenen Wirbelring. Die daraus resultierende Wirbelfläche stellt kein stabiles System dar, da sich die Wirbel hinter dem Flügel aufzurollen beginnt (siehe Abbildung 4). Je größer der Druckunterschied ausfällt, umso stärker ist die Intensität der Wirbelzöpfe. [4]

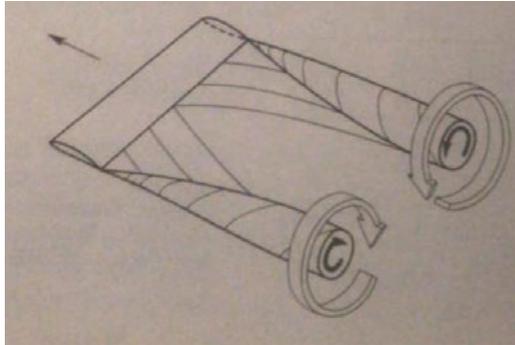


Abbildung 4 - Aufrollen der Wirbelfläche hinter dem Tragflügel [4]

Durch unterschiedliche Geometrien der Tragflächen kann der induzierte Widerstand beeinflusst werden, wodurch weniger Schub benötigt wird und der Treibstoffverbrauch reduziert werden kann. Element vieler Tragflächenkonstruktionen ist der sogenannte Biegetorsionskasten, der sowohl die Biege- als auch die Torsionslasten, die durch Auftriebs- und Widerstandskräfte entstehen, aufnehmen kann. Beim Biegetorsionskasten handelt es sich um eine Rippenbauweise, die durch Stringer versteift wird. Für die theoretische Berechnung wird das durch die Schubfeldtheorie beschriebene vereinfachte Modell eines Schubfeldträgers verwendet.

3 Bedeutung des Schubfeldträgers im Leichtbau

Schubfeldträger sind Bauteile, die besonders leichtbaugerecht sind und einen beliebigen Geometrie-Aufbau haben können. Sie bestehen aus einem oder mehreren Hautfeldern, die kontinuierlich durch Steifen (sowie Gurten, Pfosten oder Stringer) berandet werden. Der Materialeinsatz für den Strukturaufbau wird so gering gehalten wie es notwendig ist, um die Anforderungen bezüglich der Steifigkeit und Festigkeit gerade noch zu erfüllen. Betrachtet man den SFT, so sieht er einem Fachwerk ziemlich ähnlich. Das Fachwerk an sich ist für den Leichtbau eine geeignete Lösung. Durch die gleichmäßige Beanspruchung des Materials in Steifenrichtung wird es maximal zum Tragen der Lasten herangezogen. Wird jedoch eine Verkleidung gefordert, hat diese dabei keine lasttragende Funktion und stellt somit nicht die optimale Lösung für den Leichtbau dar, da sie die Masse erhöht. [8]

Bei einem SFT hingegen werden die Diagonalsteifen, die in einem Fachwerk aufzufinden sind, durch Schubfelder ersetzt. Dadurch stellen diese eine Kombination zum Tragen der Lasten und einer Verkleidung dar. Folglich ist die Verkleidung im Modell bereits vorhanden und übernimmt einen Anteil an der Übertragung von Lasten, wodurch kein zusätzliches Gewicht entsteht.[8]

Beim Schubfeldträger gelten bestimmte Voraussetzungen die erfüllt werden müssen. Die Schubfeldtheorie setzt voraus, dass

- eine kontinuierliche Verbindung zwischen dem Hautfeld und den Steifen bestehen muss
- eine Idealisierung der Stäben zu Steifen erfolgt
- eine gelenkige Verbindung der Steifen in den Knotenpunkten besteht
- eine Einleitung der Kraft nur über die Knotenpunkte erfolgt.

Im Grundsatz sagt die Theorie aus, dass wenn ein dünnwandiges durch Steifen verstärktes Profil über eine Querkraft eine Biegebelastung erfährt, sich diese Belastung aufteilt. In den Steifen tritt eine Normalkraftbelastung und im Hautfeld eine Schubbelastung auf. [8]

Die Steifen nehmen näherungsweise nur Normalkräfte auf, wodurch Biegemomente als Kräftepaare in die Steifen eingeleitet werden müssen (siehe Abbildung 5). Die Hautfelder übertragen Schubbeanspruchungen in Form von Schubflüssen und -spannungen entlang der Ränder. Betrachtet man eine reale Struktur von Schubfeldträgern, so sind die Hautfelder überwiegend eben oder nur schwach gekrümmt, wobei die Krümmung vernachlässigbar ist. [8]

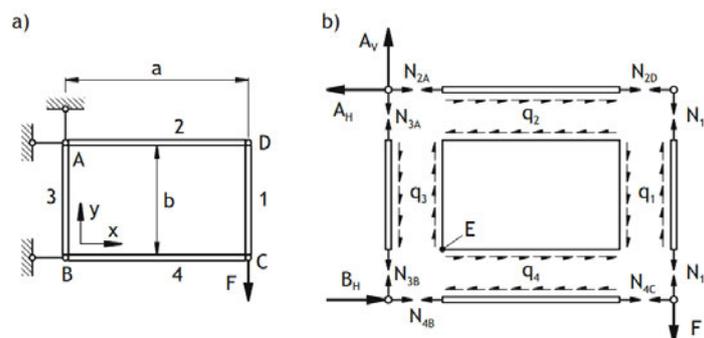


Abbildung 5 - Statisch bestimmter Schubfeldträger [a) Durch Einzelkraft F belasteter Schubfeldträger, b) Freischnitt des Schubfeldträgers] [8]

4 Konzeptentwicklung

Das bereits vorhandene Schubfeldträger Modell besteht aus berandenden Steifen, welche mit dem Hautfeld verklebt werden. Um unterschiedliche Schubfeldträgersysteme am Teststand anbringen zu können ist eine Konstruktion notwendig, die gestaltbar ist. In diesem Kapitel werden mögliche Konzepte mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt und miteinander verglichen, um eine geeignete Schubfeldträger- Variante zu finden. Nach der Schubfeldtheorie, die bereits in Kapitel 3 erwähnt wurde, ist zwischen den berandenden Steifen und den Schubfeldern eine Verbindung über die gesamte Kantenlänge erforderlich. Geht man also von einem flexiblen Schubfeldträger aus, so muss man sich ein Hautfeld umrandet von einem Rahmen aus einzelnen Steifen vorstellen, welchen man zu jeder Zeit durch weitere Hautfelder erweitern, sowie unterschiedliche Variationen aufstellen kann.

4.1 Anforderungsanalyse

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an den Schubfeldträger in Bezug auf den Teststand aufgelistet. Dies ist erforderlich, um zu überprüfen ob bestimmte Teile vorhanden, und zwingend notwendig sind um das Bauteil zu konstruieren. [1][2]

Tabelle 1 - Anforderungsanalyse

Nr.	Anforderung	Neu-Konstruktion	Kategorie
1	Flexible Konstruktion	Ja	Muss
2	Kraftanleitung an unterschiedlichen Stellen	Nein	Muss
3	Kontinuierliche Verbindung zwischen den Schubfeldern und den berandeten Steifen.	Ja	Muss
4	Gelenkige Lagerung der Steifen	Ja	Muss
5	Einspann Varianten des Versuchskörpers (Lagerreaktion)	Nein	Muss
6	Statisch bestimmtes System testen	Ja	Muss
7	Statisch unbestimmtes System testen	Ja	Kann
8	Leichtbaugerechtes Material	Ja	Muss
9	Homogenes Werkstoffverhalten	Nein	Muss
10	Verbindungselemente für Steifen und Schubfeld	Ja	Muss

Nr.	Anforderung	Neu-Konstruktion	Kategorie
11	Wiederverwendbare Teile nach Demontage	Nein	Muss
12	Leichte/ schnelle Montage/ Umstrukturierung der Schubfelder	Ja	Kann
13	Spannungsanalyse mit Messuhr	Nein	Muss
14	Spannungsanalyse mit DMS	Nein	Nicht notwendig

4.2 Lösungsfindung

4.2.1 Morphologischer Kasten

Bei einem morphologischen Kasten (siehe Tabelle 2) werden entscheidende Anforderungen oder Funktionen an den Schubfeldträger logisch aufgelistet. Durch die Kombination der Varianten können zielführende und innovative Ansätze identifiziert werden. Anschließend wird eine Bewertung durchgeführt, wodurch man bestimmte Konzepte bereits ausschließen und damit die Anzahl der zu untersuchenden Varianten reduzieren kann. [1][2]

Tabelle 2 - Morphologischer Kasten

		1 – Dauerhafte Verbindung durch Kleben mit Wechsel über die Knotenscheibe	2 – Dauerhafte Verbindung durch Niete	3 – Lösbare Verbindung durch Schrauben	4 – Klemmverbindung durch Gummilippe	5 – Klemmverbindung durch Hebelprinzip
Konstruktion des Schubfeldträgers	Verbindung zwischen den Steifen und dem Schubfeld	Kleben	Niete	Schrauben	Gummilippe	Hebel (Bilderrahmen – Prinzip)
	Gelenkige Lagerung	Scharnier	Steckverbindung	Boizenverbindung		
	Leichte/ schnelle Montage/ Umstrukturierung	Werkzeuge	Kein Werkzeug	Wenig Aufwand		
	Material	CFK	Aluminium			
Spannungsanalyse	Spannungserzeugung	Ringkraftmesser	Gewicht anhängen			
	Messung der Verformung	elektrisch	Messuhr			

Im Folgenden werden die Bestandteile der Tabelle 2 näher erklärt:

Verbindung zwischen den Steifen und dem Schubfeld

Kleben	Führt zu einer kontinuierlichen Verbindung zwischen den Steifen und dem Hautfeld – die Verbindung kann nicht mehr gelöst werden.
Nieten	Die Kontinuität der Verbindung wird minimal gestört.
Schrauben	Die Kontinuität der Verbindung wird minimal gestört.
Klemmverbindung - Gummilippe	Klapper- und spielfreie Verbindung der Steifen mit dem Hautfeld. Keine Lastübertragung möglich.
Klemmverbindung - Hebelprinzip	Kniehebelkonstruktion – Das Blech wird zwischen zwei Stabelementen eingeklemmt. Kontinuierliche Verbindung zwischen Hautfeld und Steife – sehr komplizierte Fertigung.

Gelenkige Lagerung

Scharnier	Bewegung nur in eine Richtung möglich.
Steckverbindung	Führt zu einer steifen Verbindung, wodurch eine gelenkige Lagerung erschwert wird.
Bolzenverbindung	Verbindung der Steifen mit der Knotenscheibe durch Bolzen – Bewegung in Bauteilebene bleibt erhalten – gelenkige Lagerung möglich.

Leichte/ schnelle Montage/ Umstrukturierung

Werkzeug	Durch das Lösen von Verbindungen mit Werkzeugen kann das Bauteil beschädigt werden – Umstrukturierung nimmt Zeit in Anspruch.
Kein Werkzeug	Schnelle Umstrukturierung möglich – jedoch ist eine feste Verbindung nicht gewährleistet.
Wenig Aufwand	Schnelles herausnehmen von Verbindungsstücken macht einen Umbau einfacher und führt nicht zu einer Beschädigung.

Material

CFK	Verbundwerkstoff mit geringer Dichte – hohe Belastbarkeit
Aluminium	Geringste Dichte unter den Metallen

Spannungserzeugung

Ringkraftmesser

Lasteinleitung in zwei Richtungen möglich

Gewicht anhängen

Lasteinleitung in eine Richtung möglich

Messung der Verformung

elektrisch

Der Wert wird mit einer Kraftmessdose erfasst und zurückgemeldet

Messuhr

AbleSEN der Ergebnisse an der Messuhr

Durch die Aufstellung des morphologischen Kastens ergeben sich mögliche Kombinationen, um dem Ziel zur Lösungsfindung näher zu kommen.

Lösung 1 – Blau:

In dieser Lösungsmöglichkeit wird ein flexibler Aufbau des Schubfeldträgers ermöglicht. Das hat zur Folge, dass man die Verformung an unterschiedlichen Kombinationen vornehmen kann. Bei der Konstruktion können Teile des Vorgängermodells verwendet werden und die Gesamtkonstruktion ist leicht.

Lösung 2 – Grün:

Bei dieser Lösung wird ebenfalls ein flexibler Aufbau des Schubfeldträgers ermöglicht. Die Konstruktion einer Kniehebelverbindung ist jedoch eine komplizierte Konstruktion und besteht aus vielen Einzelteilen.

Konzept 1:

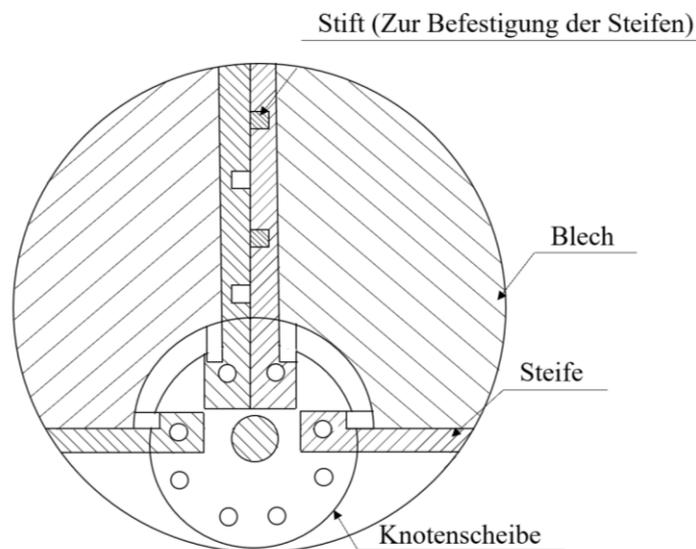


Abbildung 6 - Konzept 1

Bei dem in Abbildung 6 dargestellten Konzept, handelt es sich um eine Klebeverbindung zwischen den Steifen und den Hautfeldern. Um eine Flexibilität im Aufbau zu ermöglichen, müssen die Hautfelder einzeln gefertigt werden. Der Wechsel der Hautfelder erfolgt über die Knotenscheiben. Sobald sich zwei Hautfelder nebeneinander befinden, verdoppelt sich auch die Steifendicke, was jedoch kein Problem für den SFT darstellt.

Für die Stabilität und Einhaltung der Schubfeldtheorie, müssen die Steifen so konstruiert werden, dass sie sich in Längs- und Querrichtung nicht verschieben können. Dafür werden außen an den Steifen im Wechsel Stifte und Bohrungen angebracht, die eine Bewegung in horizontaler und vertikaler Richtung verhindern. Da die Konstruktion die im Kapitel 3 aufgelisteten Bedingungen erfüllen muss, ist eine gelenkige Lagerung der Steifen notwendig, die durch die eine Bolzenverbindung erreicht wird.

Um leichtbaugerecht zu konstruieren, wird Aluminium genutzt, welches ein in der Luft- und Raumfahrt oft eingesetztes Material ist. Die Messung der Spannung am Teststand wird durch einen Ringkraftmesser ermöglicht. Das Ablesen der Messergebnisse erfolgt mittels einer Messuhr.

Vorteile dieser Variante sind vor allem, dass bei diesem Konzept die Anforderungen bezüglich der kontinuierlichen Verbindung zwischen der Steifen und dem Blech eingehalten werden. Da heutzutage in der Luft- und Raumfahrt immer mehr Teile durch Klebstoffe verbunden werden, stellt dies eine geeignete, gewichtsparende Lösung dar. Außerdem wird die Spannung in einer solchen Verbindung gleichmäßig verteilt. Des Weiteren wird ein werkzeugloser, flexibler Umbau des Schubfeldträgers ermöglicht.

Ein Nachteil dieser Konstruktion ist die komplizierte und aufwendige Fertigung der Teile (wie zum Beispiel der Steifen), die eventuell zu erhöhten Kosten führt.

Konzept 2:

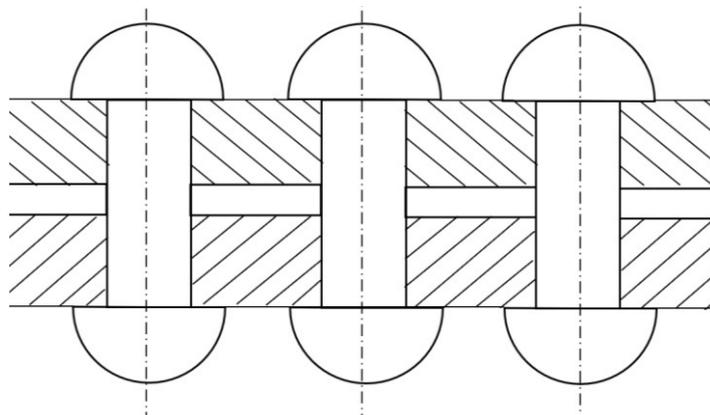


Abbildung 7 - Konzept 2

Das zweite Konzept, welches in Abbildung 7 zu sehen ist, stellt eine Verbindung der Steifen an das Blech durch Nietverbindungen dar. Die Steifen werden in zwei Teilen gefertigt und durch eine Vielzahl von Nieten miteinander befestigt, sodass eine Art Klemmverbindung entsteht.

Die Vorteile dieses Konzeptes sind zum Einen auch die Gewährleistung der kontinuierlichen Verbindung der Steifen und dem Blech und zum Anderen der Einsatz von Nieten, welcher eine leichtbaugerechte Lösung in der Luft- und Raumfahrt darstellt. Außerdem handelt es sich bei Nietverbindungen um eine kostengünstige Lösung, bei der zudem ein schlagartiges Versagen bei Überlastung ausgeschlossen ist.

Nachteile dieser Konstruktion sind jedoch, dass man die Verbindung nicht zerstörungsfrei lösen kann und die Bauteile durch die Bohrungen geschwächt werden. Des Weiteren wird durch die Bohrung der Kraftfluss unterbrochen, wodurch die Kontinuität der Verbindung teilweise gestört wird.

Konzept 3:

Bei dieser Variante wird, ähnlich wie beim zweiten Konzept, eine Klemmverbindung durch Schrauben erreicht (siehe Abbildung 8). Dabei wird die Bohrung in einem Teil der Steife mit einem Gewinde versehen, sodass keine zusätzliche Mutter benötigt wird.

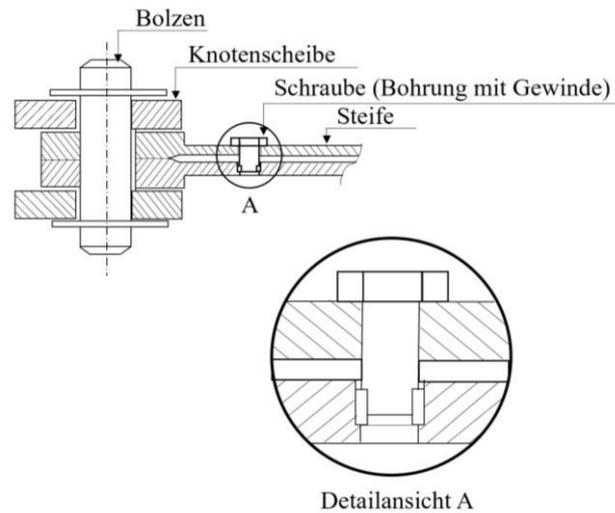


Abbildung 8 - Konzept 3

Vorteil dieses Konzeptes ist, dass die Verbindung nachjustierbar ist. Des Weiteren kann man die Schraubenverbindungen leicht ersetzen. Der Wechsel der Schrauben wird durch einfaches Werkzeug ermöglicht.

Nachteile dieser Konstruktion sind die erhöhten Kosten durch Verwendung der Schrauben. Außerdem führt starkes Ziehen zu einer plastischen Verformung. Auch wie bei den Nietverbindungen wird durch die Bohrungen am Bauteil der Kraftfluss unterbrochen und die Kontinuität der Verbindung gestört.

Konzept 4:

Bei dem in Abbildung 9 abgebildeten Konzept werden die Steifen in einem Teil gefertigt. In der Mitte der Steife befindet sich eine Nut, in die eine Gummilippe eingesetzt wird. Dort wird das Blech anschließend hineingeklemmt. Der flexible Umbau des Schubfeldträgermodells erfolgt über die Verbindung der Steifen, da man die Hautfelder, durch die Gummilippe in den Steifen, Lösen kann – es wird kein Werkzeug benötigt.

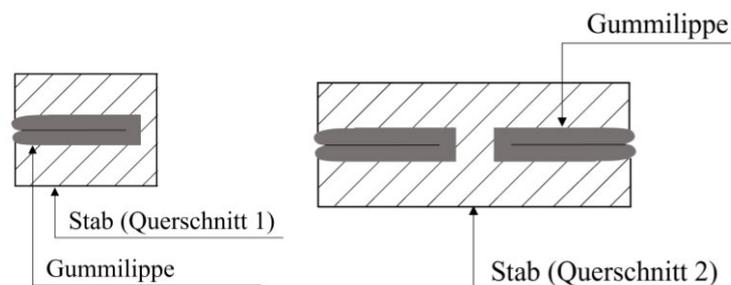


Abbildung 9 - Konzept 4

Zur Spannungserzeugung wird ein Gewicht angehängt, wodurch eine insgesamt leichte Konstruktion entsteht. Die Lasteinleitung ist jedoch nur in einer Richtung möglich. Das Ablesen der Messergebnisse erfolgt elektrisch. Eine Kraftmessdose erfasst den Wert und meldet ihn zurück.

Vorteil dieses Konzeptes ist die simple Konstruktion durch das Einsetzen einer Gummilippe in die Nut, wodurch ein Spiel und Klappern zwischen den Steifen und dem Blech verhindert werden kann.

Diese Lösungsvariante muss jedoch ausgeschlossen werden, da durch die Gummilippe keine Lastübertragung möglich ist.

Konzept 5:

Bei der Variante, die in Abbildung 10 dargestellt wird, ist ein Klemmmechanismus zwischen den zwei Teilen der Steife benötigt, der nach dem Kniehebelprinzip funktioniert. Durch das Aufklappen der Steife löst man das Blech und kann es herausnehmen. Um dieses Konzept zu ermöglichen, braucht man eine Haftverbindung zwischen der Steifen-Innenfläche und dem Blech.

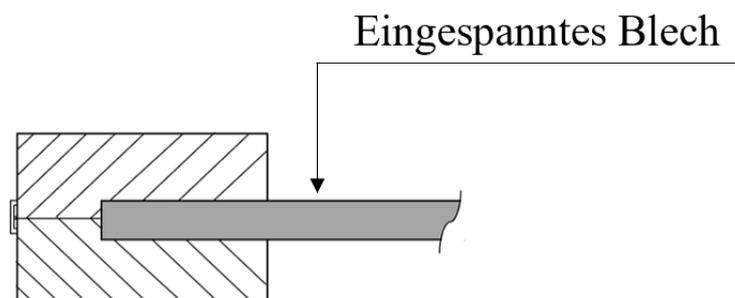


Abbildung 10 - Konzept 5

Anforderungen bezüglich der kontinuierlichen Verbindung zwischen den Steifen und dem Blech können eingehalten werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das Lösen der Klemmverbindung ohne Werkzeug möglich ist.

Nachteil hingegen ist die komplizierte Fertigung, die zu hohen Kosten führt.

4.2.2 Nutzwertanalyse

Die zuvor erwähnten Konzepte werden in diesem Teil genauer analysiert und bewertet. Dazu werden unterschiedliche Kriterien aufgestellt, die für die Umsetzung des Konzeptes relevant sind und in tabellarischer Form abgebildet (siehe Tabelle 3). Diese werden zusätzlich mit einer Gewichtungsskala versehen, da nicht jedes Kriterium dieselbe Wichtigkeit hat. Die einzelnen Kriterien werden bezogen auf die Erfüllung der gestellten Anforderungen verglichen und mit Punkten versehen – dabei gilt: 1 unwichtig, 5 sehr wichtig. Die Wichtefaktoren wurden auf Grundlage von eigenen Überlegungen aufgestellt. Dabei richtet sich die Gewichtung zusätzlich nach den vorher aufgestellten Kann- oder Muss-Kriterien. Mit Hilfe der Ergebnisse kann abschließend der Entwurf mit der höchsten Punktezahl ermittelt werden. Dieses Design wird im Rahmen dieser Masterarbeit dimensioniert, konstruiert und für die Fertigung vorbereitet. [1][2]

Tabelle 3 - Nutzwertanalyse

Kriterien	Gewichtung	Kleben		Nieten		Schrauben		Gummilippe		Klemm-Mechanismus	
		E	G	E	G	E	G	E	G	E	G
Kein Technischer Aufwand	5	4	20	2	10	2	10	4	20	2	10
Einfache Fertigung	3	2	6	2	6	2	6	2	6	1	3
Einfache Handhabung/ Montage	4	4	16	2	8	3	12	3	12	4	16
Kostengünstig	4	3	12	3	8	2	8	3	12	1	4
Werkzeugnutzung	2	2	4	1	2	1	2	2	4	2	4
Leichtbau-gerecht	4	4	16	3	12	2	8	3	12	4	16
Kontinuierliche Verbindung Steife-Hautfeld	5	5	25	3	15	3	15	1	5	5	25
Gelenkige Lagerung	5	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25
Flexibler Aufbau	5	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25
Summe		149		111		111		121		128	
Platzierung		1		4		4		3		2	

4.2.3 Lösungsauswahl

Nachdem die Konzepte mit Hilfe verschiedener Kriterien ausgewertet sind, steht das Konstruktionsprinzip des Schubfeldträgers fest. Aufgrund der in Tabelle 3 aufgestellten Bewertung wurde die Lösungsvariante 1 gewählt.

Bei dieser Variante sind die Steifen und Hautfelder dauerhaft miteinander verbunden. Für die flexible Gestaltung des Schubfeldträgers erfolgt der Wechsel der Hautfelder über die Knotenscheiben. Dabei wird das Hautfeld, welches von Steifen umrandet ist, von den Knotenscheiben gelöst und durch ein neues Hautfeld ersetzt. Gehalten werden die Steifen an den Knotenscheiben durch Bolzen.

In Abbildung 11 wird ein Schubfeldträger-Modell dargestellt. Sobald sich zwei Hautfelder nebeneinander befinden, verdoppelt sich die Steifendicke, da zwei Steifen nebeneinander liegen. Die Verbindung der Steifen muss spielfrei erfolgen. Um eine solche Verbindung zu ermöglichen, werden an den Steifen jeweils abwechselnd kleine Stifte und Bohrungen angebracht. Diese ermöglichen die Verbindung eines weiteren Schubfeldes durch die Verbindung der nebeneinander liegenden Steifen. Wichtig dabei ist es, die Teile so zu fertigen, dass bei der Verbindung kein Rütteln und Klappern entstehen kann.

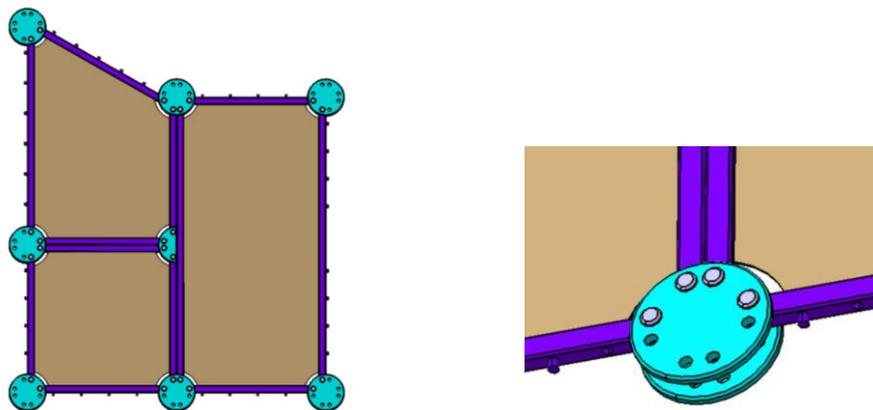


Abbildung 11 - Links: Schubfeldträger mit drei Hautfeldern; Rechts: Verbindung der Steifen

Die Hautfelder werden unabhängig voneinander gefertigt. Dadurch können unterschiedliche Formen wie Trapeze, Parallelogramme etc. miteinander verbunden werden. Anders als beim Vorgängermodell müssen die Knotenscheiben so konstruiert werden, dass man zwei Steifen nebeneinander positionieren kann (siehe Abbildung 11). Des Weiteren muss, insbesondere bei der Konstruktion, darauf geachtet werden, dass bei der Verbindung der Steifen (innerhalb der Knotenscheiben) der Abstand zwischen den Steifen nicht zu groß ist und sich die schrägen Steifen nicht berühren. Trotz der Toleranzen, (die im Verlauf dieser Arbeit in Kapitel 6.5 noch erklärt werden) muss die Kraftübertragung allein über die Bolzenverbindung stattfinden.

5 Schubfeldträgermodell I

5.1 Berechnung der inneren Kräfte des Schubfeldträgermodells

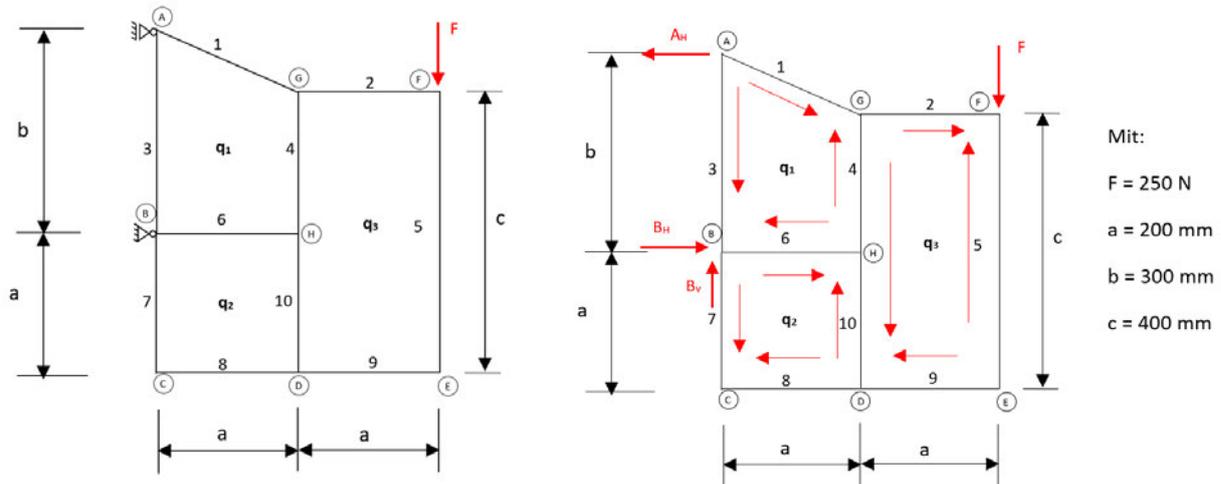


Abbildung 12 - SFT Modell 1 – 0-System– Links: Ebener SFT mit 3 Hautfeldern; Rechts: Freikörperbild

1. Überprüfung der statischen Bestimmtheit

Um zu überprüfen, ob es sich bei dem in Abbildung 12 dargestellten Schubfeldträger um ein statisch bestimmtes System handelt, wird folgende Formel verwendet:

$$U = k + m + r - 2 \cdot o = 0 \quad (1)$$

k = Anzahl der Längs- und Quersteifen

m = Anzahl Hautfelder

r = Anzahl Lagerreaktionen

o = Anzahl der Knoten

Mit:

$U = 0 \rightarrow$ Statisch bestimmtes System

$U > 0 \rightarrow$ Statisch überbestimmtes System

$U < 0 \rightarrow$ Statisch unterbestimmtes System

Setzt man nun die benötigten Informationen in die Formel (1) ein, so erhält man folgendes Ergebnis:

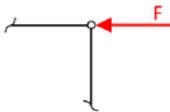
$U = 10 + 3 + 3 - 2 \cdot 8 = 0 \rightarrow$ Das System ist statisch bestimmt.

2. Berechnung der unbekanntenen Lasten sowie die Erkennung von Nullstäben

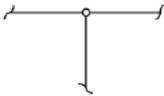
Zur Vereinfachung der Berechnung kann man sich einige Rechnungen sparen, indem man das Modell nach Nullstäben untersucht. Dazu muss auf folgende Bedingungen geachtet werden [7][8]:



Greifen an einem unbelasteten Knoten zwei Anschlussstäbe an, die nicht in die gleiche Richtung gehen, so sind diese Stäbe Nullstäbe.



Sind an einem belasteten Knoten zwei Stäbe angeschlossen wobei die Last in Richtung einer dieser Stäbe liegt, so ist die Stabkraft gleich der angreifenden Kraft und die andere Stabkraft ist gleich Null.



Greifen an einem unbelasteten Knoten drei Anschlussstäbe an, von denen zwei in gleicher Richtung liegen, so sind diese Stabkräfte gleich groß und die dritte Stabkraft ist gleich Null.

Durch das Anwenden der Regeln, können die in Tabelle 4 abgebildeten Stabkräfte als Nullstäbe erkannt und durch die Regel 2 auch ein Teil der Stabkraft ermittelt werden.

Tabelle 4 - Übersicht der erkennbaren Nullstäbe sowie Normalkräfte der Stäbe

N_{2R}	N_{50}	N_{5U}	N_{6R}	N_{7U}	N_{8L}	N_{9R}	N_{10U}
0	-F	0	0	0	0	0	0

Zunächst muss das Gesamtsystem, wie in Abbildung 12 dargestellt, freigeschnitten werden um die Lagerkräfte zu bestimmen. Im Anschluss dazu erfolgt die Berechnung der Normalkräfte der Stäbe.

$$\Sigma \uparrow: 0 = B_v - F$$

$$\rightarrow B_v = F = 250 \text{ N}$$

$$\Sigma M_B : 0 = A_H \cdot b - F \cdot 2a$$

$$\rightarrow A_H = \frac{F \cdot 2a}{b} = 333 \text{ N}$$

$$\Sigma \rightarrow: 0 = B_H - A_H$$

$$\rightarrow B_H = 333 \text{ N}$$

Zur Berechnung der Normalkraft wird ein Schnitt an die einzelnen Steifen gesetzt oder aber auch am Knoten freigeschnitten.

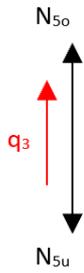


Abbildung 13 - Steife 5 - Schnitt 1

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{5o} + q_3 \cdot c$$

$$q_3 = \frac{5}{8} \frac{N}{mm}$$

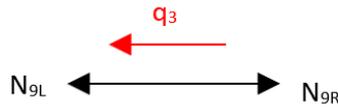


Abbildung 14 - Steife 9 - Schnitt 2

$$\Sigma \rightarrow: 0 = -N_{9L} - q_3 \cdot a + N_{9R}$$

$$N_{9L} = -125 N$$



Abbildung 15 - Steife 8 - Schnitt 3

$$\Sigma \rightarrow: 0 = -N_{8L} - q_2 \cdot a + N_{8R}$$

$$q_2 = -\frac{5}{8} \frac{N}{mm}$$

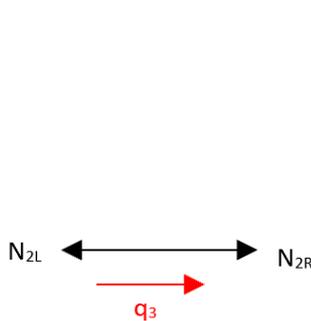


Abbildung 16 - Steife 2 - Schnitt 4

$$\Sigma \rightarrow: 0 = N_{2R} - N_{2L} + q_3 \cdot a$$

$$N_{2L} = 125 N$$



Abbildung 17 - Steife 7 - Schnitt 5

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{7o} - q_2 \cdot a - N_{7u}$$

$$N_{7o} = -125 N$$

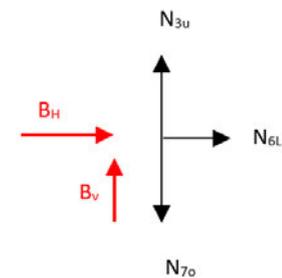


Abbildung 18 - Knoten B - Schnitt 6

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{3u} - N_{7o} + B_V$$

$$N_{3u} = -375 N$$

$$\Sigma \rightarrow: 0 = N_{6L} + B_H$$

$$N_{6L} = -B_H = -333 N$$

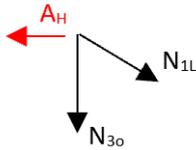


Abbildung 19 - Knoten A - Schnitt 7

$$\Sigma \rightarrow: 0 = -A_H + N_{1L} \cdot \cos \beta$$

$$N_{1L} = 372,3 \text{ N}$$

$$\Sigma \uparrow: 0 = -N_{3o} - N_{1L} \cdot \cos \alpha$$

$$N_{3o} = -166,5 \text{ N}$$

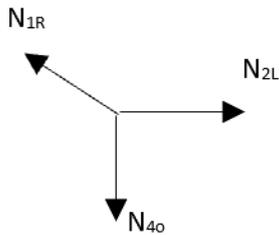


Abbildung 22 - Knoten G - Schnitt 10

$$\Sigma \rightarrow: 0 = -N_{1R} \cdot \cos 26,565 + N_{2L}$$

$$N_{1R} = 139,75 \text{ N}$$

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{1R} \cdot \sin 26,565 - N_{4o}$$

$$N_{4o} = 62,5 \text{ N}$$

Mit der folgenden Formel kann der mittlere Schubfluss vom Trapezfeld bestimmt werden.

$$q_{1m} = \sqrt{q_{1R} \cdot q_{1L}} \quad (2)$$

$$q_{1m} = 1,397 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$



Abbildung 20 - Steife 3 - Schnitt 8

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{3o} - q_{1L} \cdot b - N_{3u}$$

$$q_{1L} = 0,695 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

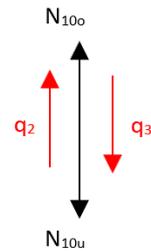


Abbildung 21 - Steife 10 - Schnitt 9

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{10o} + q_2 \cdot a - N_{10u} - q_3 \cdot c$$

$$N_{10o} = 375 \text{ N}$$

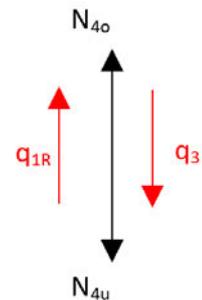


Abbildung 23 - Steife 4 - Schnitt 11

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{4o} + q_{1R} \cdot a - N_{4u} - q_3 \cdot c$$

$$q_{1R} = 2,813 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Tabelle 5 - Zusammenfassung der Steifenkräfte und Schubflüsse

N_{1L} (in N)	372,7	N_{7O} (in N)	-125
N_{1R} (in N)	139,75	N_{7U} (in N)	0
N_{2L} (in N)	125	N_{8L} (in N)	0
N_{2R} (in N)	0	N_{8R} (in N)	-125
N_{3O} (in N)	-166,7	N_{9L} (in N)	-125
N_{3U} (in N)	-375	N_{9R} (in N)	0
N_{4O} (in N)	62,5	N_{10O} (in N)	375
N_{4U} (in N)	375	N_{10U} (in N)	0
N_{5O} (in N)	-250	q_{1m} (in N/mm)	1,397
N_{5U} (in N)	0	q_2 (in N/mm)	-5/8
N_{6L} (in N)	-333	q_3 (in N/mm)	5/8
N_{6R} (in N)	0		

5.1.1 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Kraftangriffspunkt F

Für die vertikale Verschiebung am Knotenpunkt F des Schubfeldträgers wird das Prinzip der virtuellen Kräfte verwendet. Zur Überprüfung an welchem Punkt die maximale Verschiebung stattfindet, wird zunächst am *Knoten F* und anschließend im *Knoten E* eine virtuelle Kraft der Größe 1 angebracht (Siehe Abbildung 24). Nach der Bestimmung der Lagerkräfte folgt die Berechnung der Steifenkräfte.

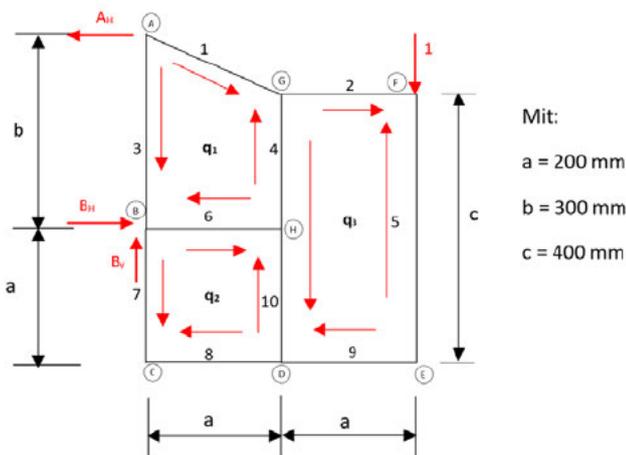


Abbildung 24 - Freischnitt vom Schubfeldträgermodell I - 1-System am Knotenpunkt F

$$\Sigma \uparrow: 0 = B_v - 1$$

$$B_v = 1$$

$$\Sigma M_B : 0 = A_H \cdot b - 1 \cdot 2a$$

$$A_H = \frac{4}{3}$$

$$\Sigma \rightarrow: 0 = B_H - A_H$$

$$B_H = \frac{4}{3}$$



Abbildung 25 - Steife 5 - Schnitt 1



Abbildung 26 - Steife 2 - Schnitt 2

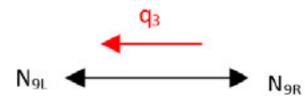


Abbildung 27 - Steife 9 - Schnitt 3

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{5o} + q_3 \cdot c$$

$$\Sigma \rightarrow: 0 = N_{2R} - N_{2L} + q_3 \cdot a$$

$$\Sigma \rightarrow: 0 = -N_{9L} - q_3 \cdot a + N_{9R}$$

$$q_3 = \frac{1}{400} \frac{1}{mm}$$

$$N_{2L} = \frac{1}{2}$$

$$N_{9L} = -\frac{1}{2}$$

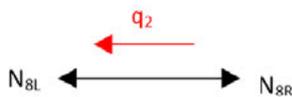


Abbildung 28 - Steife 8 - Schnitt 4

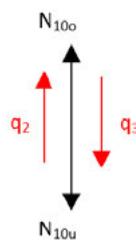


Abbildung 29 - Steife 10 - Schnitt 5

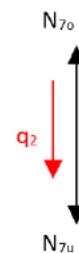


Abbildung 30 - Steife 7 - Schnitt 6

$$\Sigma \rightarrow: 0 = -N_{8L} - q_2 \cdot a + N_{8R}$$

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{10o} + q_2 \cdot a - N_{10u} - q_3 \cdot c$$

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{7o} - q_2 \cdot a - N_{7u}$$

$$q_2 = -\frac{1}{400} \frac{1}{mm}$$

$$N_{10o} = \frac{3}{2}$$

$$N_{7o} = -\frac{1}{2}$$

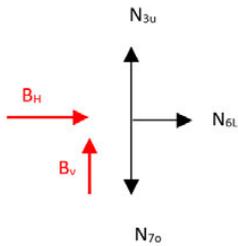


Abbildung 31 - Knoten B – Schnitt 7

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{3u} - N_{7o} + B_V$$

$$N_{3u} = -\frac{3}{2}$$

$$\Sigma \rightarrow: 0 = N_{6L} + B_H$$

$$N_{6L} = -B_H = -\frac{4}{3}$$

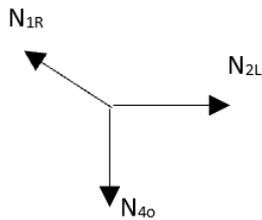


Abbildung 34 - Knoten G – Schnitt 10

$$\Sigma \rightarrow: 0 = -N_{1R} \cdot \cos 26,565 + N_{2L}$$

$$N_{1R} = 0,559$$

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{1R} \cdot \sin 26,565 - N_{4o}$$

$$N_{4o} = \frac{1}{4}$$

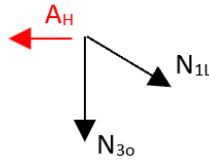


Abbildung 32 - Knoten A - Schnitt 8

$$\Sigma \rightarrow: 0 = -A_H$$

$$+N_{1L} \cdot \sin 63,43^\circ$$

$$N_{1L} = \frac{3}{2}$$

$$\Sigma \uparrow: 0 = -N_{3o} - N_{1L} \cdot \cos \alpha$$

$$N_{3o} = -0,67$$

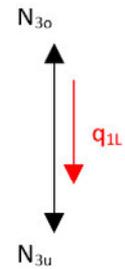


Abbildung 33 - Steife 3 - Schnitt 9

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{3o} - q_{1L} \cdot b - N_{3u}$$

$$q_{1L} = 2,76 \cdot 10^{-3} \frac{1}{mm}$$

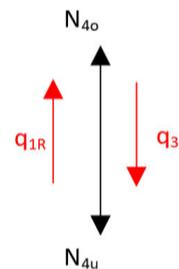


Abbildung 35 - Steife 4 - Schnitt 11

$$\Sigma \uparrow: 0 = N_{4o} + q_{1R} \cdot a$$

$$-N_{4u} - q_3 \cdot c$$

$$q_{1R} = \frac{9}{800} \frac{1}{mm}$$

Durch einsetzen der Schubflüsse am Rand der Steifen 3 und 4 des ersten Hautfeldes in die Formel (2) kann der mittlere Schubfluss vom Trapezfeld bestimmt werden. [8]

$$q_{1m} = 5,572 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{mm}}$$

Tabelle 6 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Knotenpunkt F

N_{1L}	3/2	N_{7O}	-1/2
N_{1R}	0,559	N_{7U}	0
N_{2L}	$\frac{1}{2}$	N_{8L}	0
N_{2R}	0	N_{8R}	-1/2
N_{3O}	-0,67	N_{9L}	-1/2
N_{3U}	-3/2	N_{9R}	0
N_{4O}	1/4	N_{10O}	3/2
N_{4U}	3/2	N_{10U}	0
N_{5O}	-1	q_{1m} (in 1/mm)	$5,572 \cdot 10^{-3}$
N_{5U}	0	q_2 (in 1/mm)	-1/400
N_{6L}	-4/3	q_3 (in 1/mm)	1/400
N_{6R}	0		

Durch die Berechnung der virtuellen Normalkräfte, kann nunmehr die Verschiebung am Knoten F berechnet werden [8]

$$f_{xv} = \sum_{i=1}^{10} \int_0^l \frac{N_i \cdot \bar{N}_i}{EA} dx_i + \sum_{j=1}^3 \frac{q_j \bar{q}_j A}{(G \cdot t)_j} \quad (3)$$

Für die Dehnsteifigkeit EA wird die Querschnittsfläche der Steife von $A = 58,4 \text{ mm}^2$ eingesetzt.

Für das Schubmodul G kann die folgende Formel eingesetzt werden

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

Die Querkontraktion ν beträgt bei Aluminium 0,3 und die Wandstärke $t = 0,8 \text{ mm}$

Für das Trapezfeld jedoch muss für die in Formel (3) angegebene Fläche A ein Ersatzflächeninhalt eingesetzt werden. Für den Ersatzflächeninhalt gilt:

$$A^* = A \left[1 + \frac{2}{3(1 + \nu)} ((\tan \alpha_0)^2 + \tan \alpha_0 \tan \alpha_1 + (\tan \alpha_1)^2) \right] \quad (5)$$

Für den Flächeninhalt des Trapezes folgt $A=50000 \text{ mm}^2$, woraus sich ein Ersatzflächeninhalt von $A^*=56410 \text{ mm}^2$ ergibt.

Dabei ist α_1 der Winkel zwischen Steife 1 und 4 und beträgt $26,565^\circ$ und $\alpha_0 = 0$

Die Verwendung von q_m und A^* führt dazu, dass man die Formänderungsenergie für das Trapez-, das Parallelogramm- und Rechteckfeld in einer einheitlichen Schreibweise angeben kann.

Bei N_i handelt es sich um den Normalkraftverlauf, der in Folge der realen Kraft F auftritt und von der Längsachse der Steife abhängt. \bar{N}_i ist der virtuelle Normalkraftverlauf, der durch die virtuelle Kraft mit dem Wert 1 ausgelöst wird.

Mit Hilfe der Normalkraftverläufe beider Systeme (vgl. Abbildung 36), kann durch das Prinzip der virtuellen Kräfte (PvK) die Verschiebung am Knotenpunkt F ermittelt werden. Diese Berechnung erfolgt durch die Koppeltafel zur Integration (siehe Abbildung 37) und der Formel (3).

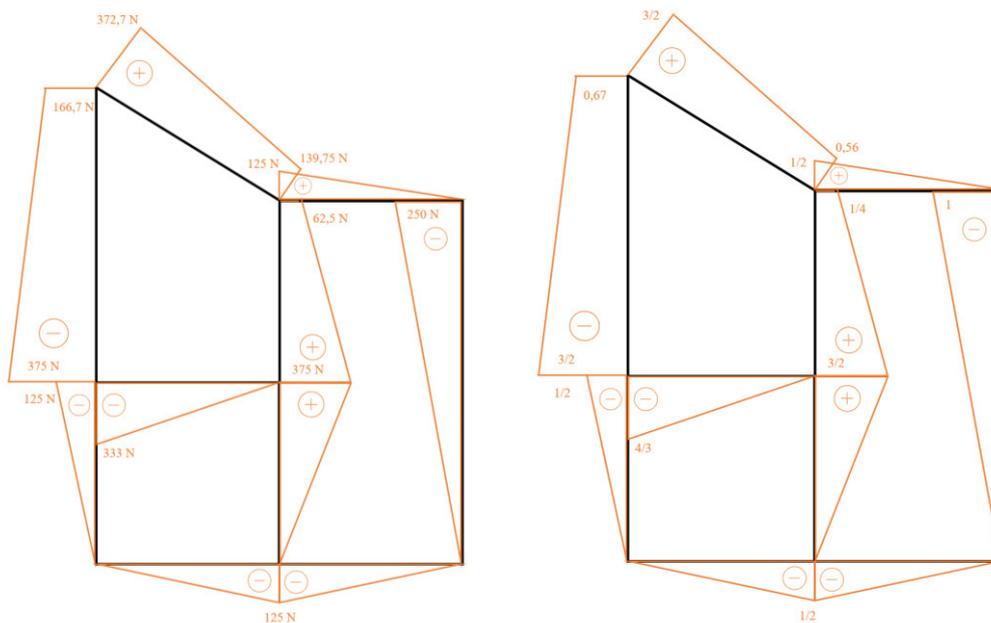


Abbildung 36 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf

Es folgt eine Verschiebung in vertikaler Richtung von:

$$f_{FV} = 0,1068 \text{ mm}$$

	acl	$\frac{acl}{2}$	$\frac{al}{2}(c+d)$	$\frac{acl}{3}$	$\frac{2acl}{3}$
	$\frac{acl}{2}$	$\frac{acl}{3}$	$\frac{al}{6}(c+2d)$	$\frac{acl}{4}$	$\frac{5acl}{12}$
	$\frac{acl}{2}$	$\frac{acl}{6}$	$\frac{al}{6}(2c+d)$	$\frac{acl}{12}$	$\frac{acl}{4}$
	$\frac{cl}{2}(a+b)$	$\frac{cl}{6}(a+2b)$	$\frac{la}{6}(2c+d) + \frac{lb}{6}(c+2d)$	$\frac{cl}{12}(a+3b)$	$\frac{cl}{12}(3a+5b)$
	$\frac{acl}{3}$	$\frac{acl}{4}$	$\frac{al}{12}(c+3d)$	$\frac{acl}{5}$	$\frac{3acl}{10}$
	$\frac{acl}{3}$	$\frac{acl}{12}$	$\frac{al}{12}(3c+d)$	$\frac{acl}{30}$	$\frac{2acl}{15}$
	$\frac{2acl}{3}$	$\frac{5acl}{12}$	$\frac{al}{12}(3c+5d)$	$\frac{3acl}{10}$	$\frac{8acl}{15}$
	$\frac{2acl}{3}$	$\frac{acl}{4}$	$\frac{al}{12}(5c+3d)$	$\frac{2acl}{15}$	$\frac{11acl}{30}$

Abbildung 37 - Koppeltafel zur Integration [1]

5.1.2 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Knotenpunkt E

In Abbildung 38 wird das Freikörperbild für die Verschiebung am Knotenpunkt E dargestellt. Mit Hilfe der selben Formeln, wie bereits in 5.1.1 verwendet, wird die Berechnung der Verschiebung am Knotenpunkt E durchgeführt. Zunächst erfolgt die Berechnung der Lagerkräfte und anschließend die Berechnung der virtuellen Steifenkräfte.

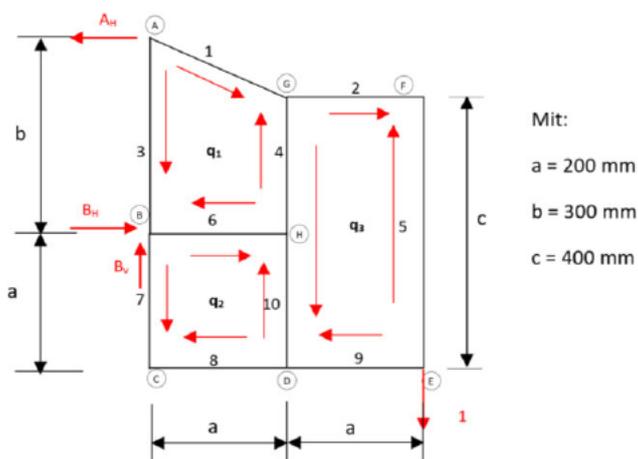


Abbildung 38 - Freischnitt vom Schubfeldträgermodell I - 1-System am Knotenpunkt E

Daraus ergeben sich die in Tabelle 7 aufgelisteten virtuellen Normalkräfte der Steifen. Zur Berechnung der Verschiebung, werden die Formeln (3) – (5) verwendet.

Tabelle 7 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Knotenpunkt E

N_{1L}	$3/2$	N_{70}	$-1/2$
N_{1R}	$0,56$	N_{7U}	0
N_{2L}	$1/2$	N_{8L}	0
N_{2R}	0	N_{8R}	$-1/2$
N_{30}	$-0,67$	N_{9L}	$-1/2$
N_{3U}	$-3/2$	N_{9R}	0
N_{40}	$1/4$	N_{100}	$3/2$
N_{4U}	$3/2$	N_{10U}	0
N_{50}	0	q_{1m} (in 1/mm)	$5,579 \cdot 10^{-3}$
N_{5U}	1	q_2 (in 1/mm)	$-1/400$
N_{6L}	$-4/3$	q_3 (in 1/mm)	$1/400$
N_{6R}	0		

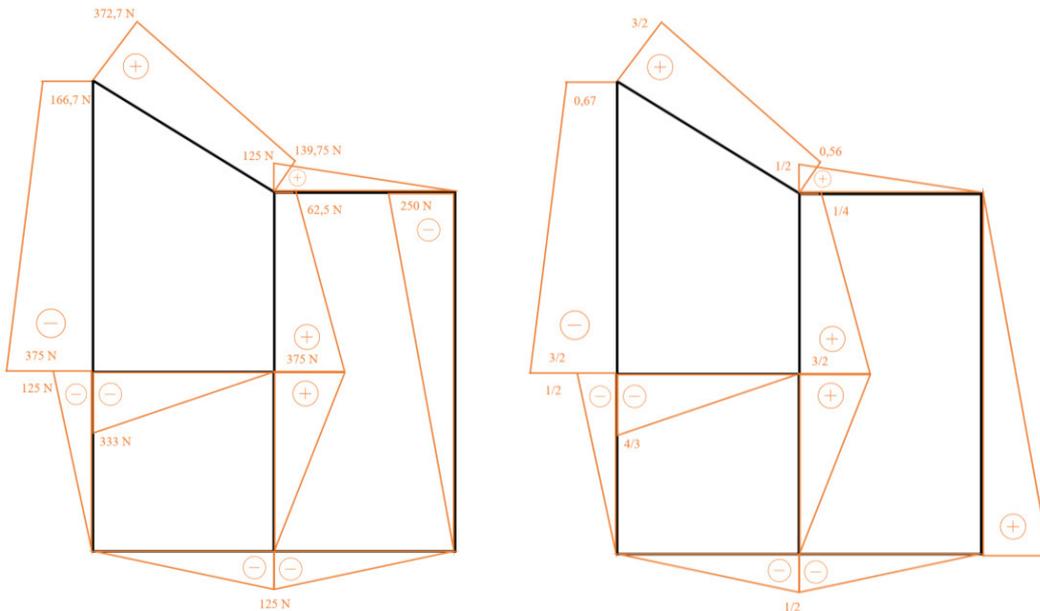


Abbildung 39 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf

Daraus folgt nunmehr mit Hilfe der Koppeltafel in Abbildung 37 eine virtuelle Verschiebung von:

$$f_{EV} = 0,0945 \text{ mm}$$

5.2 Dimensionierung der Bauteile

Mit den bereits berechneten Lasten erfolgt die Dimensionierung der Einzelteile. Mit den ermittelten, maximalen Belastungen sowie den Materialkennwerten kann zunächst der Stabilitätsnachweis durchgeführt werden. Betrachtet man die Steifen wird die Annahme getroffen, dass diese anhand ihrer Schlankheit gelenkig miteinander verbunden sind und nur Normalkräfte aufnehmen können. Biegemomente werden als Längskräfte in den Steifen mit dem Steifenabstand als Hebelarm berücksichtigt. Hierbei wird das Euler Knicken betrachtet.

Um das System als dünnwandig zu bezeichnen, muss das Blech um ein Vielfaches dünner sein als die Steifen. Ähnlich wie bei den Steifen muss auch das Blech auf Stabilitätsversagen überprüft werden, dabei wird das Beulen des Blechs untersucht. Durch die Vereinfachung, dass im Blech nur die Schubanteile übertragen werden (Schubfeldtheorie), wird das Beulen eintreten.

Für die Steifen und die Bleche wird wie beim Vorgängermodell Aluminium als Werkstoff verwendet. Die technischen Zeichnungen zu den einzelnen Bauteilen, sind im Anhang A zu finden.

Tabelle 8 - Materialkennwerte [12]

Bauteil	Material	Min. Streckgrenze $R_{p0,2}$ (N/mm)	Min. Zugfestigkeit R_m (N/mm)	Elastizitätsmodul (N/mm)
Steifen, Knotenscheibe und Verbindungs- elemente	AlMgSi1	240	295	70000
Blech	AlMg3	80	190	70000

5.3 Stabilitätsnachweis

5.3.1 Euler-Knicken – Steife

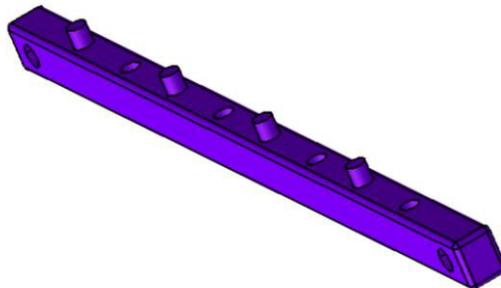


Abbildung 40 - Konstruktion der Steifen

Abbildung 40 zeigt die Steife für das SFT Modell, das auf seine Stabilität untersucht werden muss. Das Euler Knicken setzt ein linear elastisches Materialversagen voraus. Das gilt jedoch nur solange die Knickspannung unterhalb der Proportionalitätsgrenze $R_{p0,2}$ bleibt. Die folgende Berechnung richtet sich nach den in Tabelle 5 aufgelisteten Normalkräften der Steifen. Für die Berechnung wird die maximale Steifenkraft verwendet. [8][9]. Der Euler Knickfall wird gemäß Abbildung 41 bestimmt.

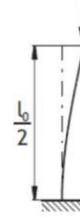
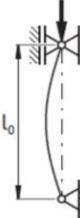
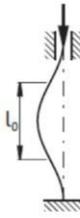
Euler-Fall	I	II	III	IV
Lagerung				
k_E	1/4	1	2,04	4
Knickform				
l_0	2l	l	l/1,43	l/2

Abbildung 41 - Euler Knickfälle [8]

In hinreichender Entfernung vom Rand der Steife ist die Normalspannung gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Auch bei einer Steife mit schwach veränderlichem Querschnitt gilt in guter Näherung eine gleichmäßige Verteilung der Normalspannung über den Querschnitt. Es gilt:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{N}{A(x)} \quad (6)$$

Mit:

- $F = N = 375 \text{ N}$ (maximale Steifenkraft)
- $A = (8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} - 1,1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} - 4,3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}) = 58,4 \text{ mm}^2$

Durch Einsetzen der Werte in die Formel (6) erhält man für die Spannung folgendes Ergebnis:

$$\sigma = \frac{N}{A(x)} = \frac{375 \text{ N}}{58,4 \text{ mm}^2} = 6,42 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Für die Prüfung, ob die Steife versagt, muss der Betrag der Normalspannung der Proportionalitätsgrenze $R_{p0,2}$ gegenübergestellt werden.

$$|\sigma| > \sigma_{max} \quad (7)$$

$$6,42 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Der Wert liegt unterhalb der Proportionalitätsgrenze.

Sicherheit gegen Knicken

$$S = \frac{F_{crit}}{F_{vorh}} \quad (8)$$

Mit:

- F_{crit} = kritische Eulersche Knicklast
- F_{vorh} = vorhandene maximale Steifenkraft

Für die Berechnungen des in Abbildung 42 dargestellten Querschnitts, werden die abgerundeten Kanten vernachlässigt.

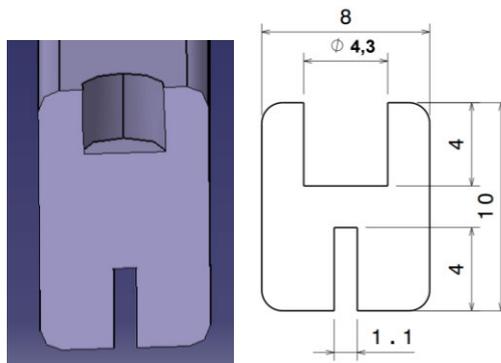


Abbildung 42 - Querschnitt Steife (Maße in mm)

Um das Flächenträgheitsmoment zu berechnen, gilt folgende Formel:

$$I = \frac{B \cdot H^3}{12} \quad (9)$$

Da der Querschnitt der Steife nicht aus einem einfachen Rechteck besteht, müssen vom Gesamtträgheitsmoment die Fläche der Nut, in die das Blech eingeklebt wird, sowie die Fläche der Bohrung für die Befestigungselemente abgezogen werden.

$$I_{ges} = \frac{B_S \cdot H_S^3}{12} - \frac{B_N \cdot H_N^3}{12} - \frac{B_B \cdot H_B^3}{12} \quad (10)$$

Mit:

- $B_S = 10 \text{ mm}$ (Steife Gesamt) $B_N = 4 \text{ mm}$ (Nut) $B_B = 4,3 \text{ mm}$ (Bohrung)
- $H_S = 8 \text{ mm}$ $H_N = 1,1 \text{ mm}$ $H_B = 4 \text{ mm}$

Durch das Einsetzen der Werte in die Formel (10) folgt ein I_{ges} von:

$$I_{ges} = 403,3 \text{ mm}^4$$

Mit Hilfe des berechneten Flächenträgheitsmoments wird das Knicken der Steife für den passenden Euler Fall berechnet. In dieser Konstruktion wird der *Euler Fall 2* benutzt, da es sich um ein gelenkig gelagerten Steife handelt. Somit gilt:

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{s_k^2} \quad (11)$$

Aufgrund der Krafteinleitung im Knotenpunkt F und einer Steifenlänge von 400 mm an der Steife 5 wird das Euler Knicken bezüglich der genannten Länge untersucht (vgl. Abbildung 12).

Mit:

$$s_k = l = 400 \text{ mm}$$

Eingesetzt in (11):

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot 70000 \text{ MPa} \cdot 403,3 \text{ mm}^4}{(400 \text{ mm})^2} = 1741,43 \text{ N}$$

Folgt eine Sicherheit von:

$$S = 4,64$$

Demnach gilt, dass der Steife für den Fall Knicken ausreichend ausgelegt ist.

Tabelle 9 - Größen zur Berechnung der Knicksicherheit

sk = l	I	F _{vorh}	F _{crit}	S
400 mm	403,3 mm ⁴	375 N	1741,43 N	4,64

5.3.2 Beulen der Hautfelder



Abbildung 43 - Quadratisches Hautfeld – Blech

Hautfelder mit geringen Hautfelddicken können durch eine Schubbelastung in Bauteilebene beulen. Da das Blech in Abbildung 43 vollständig von Steifen umrandet wird, wird es als allseitig gelenkig gelagert betrachtet.

Die kritische Schubspannung kann in Analogie zur klassischen Formel der Eulerschen Knickspannung (Formel (11)) dargestellt werden. Dabei wird die Länge l nach der Eulerschen Theorie des Knickens gegen die Feldbreite a ausgetauscht.

Dadurch entsteht:

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{a^2} \quad (12)$$

Setzt man in die Gleichung (12) die Formel für das Flächenträgheitsmoment sowie die Querschnittsfläche A für die Knickspannung ein, so folgt daraus:

$$\sigma_K = \frac{F_K}{b \cdot t} = \frac{b^2}{a^2} \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot b^2} \quad (13)$$

Die Spannungen senkrecht zur Ebene können vernachlässigt werden, da sie gegenüber der Biegespannungen sehr klein sind. Die Querkontraktion im Hautfeld muss für die Stabilitätsrechnung berücksichtigt werden. Somit kann die Formel (13) erweitert werden und daraus folgt:

$$\sigma_{crit} = \frac{b^2}{a^2} \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} \quad (14)$$

Das Verhältnis $\frac{b^2}{a^2}$ wird vereinfacht als k bezeichnet und Beulwert genannt. In der Literatur wird dieser üblicherweise mit

$$k^* = \frac{k}{12} \frac{\pi^2}{(1 - \nu^2)} \quad (15)$$

bezeichnet. Beim Schubbeulen wird $k_\tau^* = \frac{k_\tau}{12} \frac{\pi^2}{(1 - \nu^2)}$ angegeben.

Mit der Formel (15) kann nun in Analogie zu Eulerschen Knickspannung die kritische Schubspannung folgendermaßen berechnet werden:

$$\tau_{crit} = k_\tau^* \cdot E \frac{t^2}{b^2} \quad (16)$$

Dabei gilt immer, dass b die kürzeste Seitenlänge des Hautfeldes ist.

Der Beulfaktor k_τ eines quadratischen sowie rechteckigen Hautfeldes kann in Abbildung 44 abgelesen werden. Bei einem quadratischen Hautfeld ist das Seitenverhältnis 1, und es wird als allseitig gelenkig gelagert angesehen, dies entspricht in der Abbildung der Kurve I.

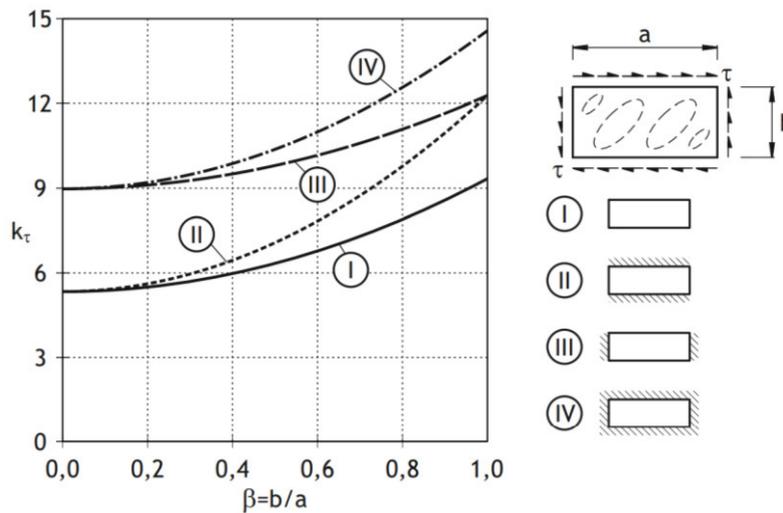


Abbildung 44 - Diagramm zur Ermittlung des Beulwertes [8]

Es folgt ein $k_\tau = 9,1$. Durch das Einsetzen des Beulfaktors in Gleichung (15) erhalten wir ein $k_\tau^* = 8,2$.

Um die Sicherheit gegen Beulen zu ermitteln, wird folgende Formel benötigt:

$$S = \frac{\tau_{crit}}{\tau_{vorh}} \quad (17)$$

Dazu wird die vorhandene Schubbelastung mit

$$\tau_{vorh} = \frac{q_{max}}{t} \quad (18)$$

ermittelt.

Durch Einsetzen der Werte in die Formel (16) ergibt sich eine kritische Schubbeanspruchung von

$$\tau_{crit} = 9,18 \frac{N}{mm^2}$$

sowie die vorhandene Schubbelastung aus (Formel (18)) mit $q = 5/8 \frac{N}{mm}$, von

$$\tau_{vorh} = \frac{5/8 \frac{N}{mm}}{0,8} = \frac{25}{32} \frac{N}{mm^2}$$

lässt sich eine Sicherheit gegen Beulen von

$$S = \frac{9,18 \frac{N}{mm^2}}{25/32 \frac{N}{mm^2}} = 11,75$$

ermitteln.

Das quadratische Hautfeld ist mit einer Sicherheit von $S = 11,75$ ausreichend gegen das Beulen ausgelegt.

Als nächstes folgt die Berechnung des Trapez Hautfeldes (siehe Abbildung 45). Für die Berechnung wird das Trapezfeld in Näherung als Rechteckfeld betrachtet.



Abbildung 45 - Trapez – Hautfeld

Nachfolgend wird die Sicherheit gegen Beulen am Trapezhautfeld berechnet. Da sich bei einer geringeren Feldbreite die Sicherheit gegen Beulen erhöht, muss die Berechnung für die kritischste Stelle des Trapezes durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um die längste Stelle der Steife.

Mit der Formel (16) wird zunächst die kritische Schubbelastung bestimmt. Dazu wird der Beulwert für den Querschnitt des Trapezfeldes benötigt. Mit einem Seitenverhältnis $b/a = 0,6$ lässt sich aus Abbildung 44 ein Beulwert von $k_{\tau} = 6,3$ ermitteln.

Durch das Einsetzen des Beulfaktors in Gleichung (15) ergibt sich ein Wert von $k_{\tau}^* = 5,7$, woraus sich eine kritische Schubspannung von

$$\tau_{crit} = 6,4 \frac{N}{mm^2}$$

ergibt.

Das Einsetzen des mittleren Schubflusses $q = 1,397 \frac{N}{mm}$ des Trapezes in die Gleichung (18) ergibt eine vorhandene Schubspannung von:

$$\tau_{vorh} = 1,75 \frac{N}{mm^2}$$

Woraus sich mit Hilfe der Gleichung (17) eine Sicherheit von $S = 3,9$ bestimmen lässt.

Mit der nächsten Berechnung wird das Rechteck Hautfeld untersucht (siehe Abbildung 46).

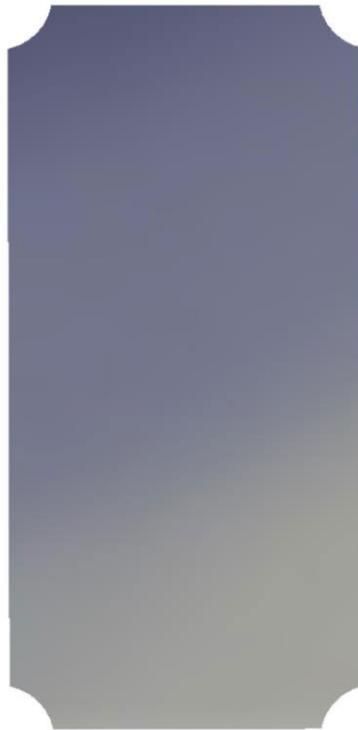


Abbildung 46 - Rechteck - Hautfeld

Wie in den Berechnungen zuvor wird mit Hilfe der Formeln (16), (17) und (18) die Sicherheit gegen Beulen untersucht. Dabei wird mit einem Seitenverhältnis von $b/a = 0,5$, aus Abbildung 44, ein Beulfaktor von $k_{\tau} = 6,2$ abgelesen.

Durch das Einsetzen des Beulfaktors in Gleichung (15) ergibt sich $k_{\tau}^* = 5,6$, woraus sich folgendes Ergebnis berechnen lässt:

$$\tau_{crit} = 6,27 \frac{N}{mm^2}$$

Mit dem Schubfluss des rechteckigen Hautfeldes von $q = 5/8 \frac{N}{mm}$ ergibt sich eine vorhandene Schubspannung von:

$$\tau_{vorh} = \frac{5/8 \frac{N}{mm}}{0,8 \frac{mm^2}{mm^2}} = \frac{25 \frac{N}{mm^2}}{32 \frac{mm^2}{mm^2}}$$

Daraus folgt eine Sicherheit von:

$$S = \frac{6,27 \frac{N}{mm^2}}{\frac{25 \frac{N}{mm^2}}{32 \frac{mm^2}{mm^2}}} = 8,03$$

➔ Zusammenfassend ergeben sich folgende Werte zum Vergleich:

Tabelle 10 - Übersicht über die Sicherheitswerte bezüglich des Beulens

	Hautfeld Quadrat	Hautfeld Trapez	Hautfeld Rechteck
k_{τ}	9,1	6,3	6,2
k_{τ}^*	8,2	5,7	5,6
τ_{crit}	$9,18 \frac{N}{mm^2}$	$6,4 \frac{N}{mm^2}$	$6,27 \frac{N}{mm^2}$
τ_{vorh}	$\frac{25}{32} \frac{N}{mm^2}$	$1,75 \frac{N}{mm^2}$	$\frac{25}{32} \frac{N}{mm^2}$
S	11,75	3,66	8,03

6 Festigkeitsnachweis

6.1 Auslegung des Bolzens

Der Bolzen (siehe Abbildung 47) befindet sich in der Steife und der Knotenscheibe und wird lediglich durch ein Sicherungsring gehalten. Bei üblichen Ausführungen von nicht gleitenden Flächen (ruhende Gelenke) ist die Biegung für die Bemessung der Verbindung maßgebend. Es wird der gleiche Bolzen wie in der bereits erwähnten Bachelorarbeit verwendet [12]. Das Datenblatt dazu befindet sich in Anhang B.



Abbildung 47 - Bolzen mit Einstich [12]

Unter der Annahme, dass es sich um eine reine Biegebeanspruchung handelt, wird folgende Gleichung für die Berechnung des notwendigen Bolzendurchmessers verwendet [6]:

$$d \approx k \cdot \sqrt{\frac{k_A \cdot F_{nenn}}{\sigma_{bzul}}} \quad (19)$$

Mit den folgenden Werten

$k = 1,6$ Einspannfaktor, abhängig vom Einbaufall
(Einbaufall 1 – Bolzen lose in Stange und Gabel)

$k_A = 1,0$ Anwendungsfaktor zur Berücksichtigung stoßartiger Belastung
(Für Gleichmäßige getriebene Maschinen)

$F_{\text{nenn}} = 375 \text{ N}$ Maximale Steifenlast

$\sigma_{\text{bzul}} = 186 \text{ N/mm}^2$ zulässige Biegespannung, bei ruhender Belastung gilt:
 $0,3 R_m$

folgt ein Bolzendurchmesser von:

$$d = 4,72 \text{ mm}$$

Zur Überprüfung, ob ein Mindestdurchmesser von $d = 4,72 \text{ mm}$ ausreichend ist, muss eine Festigkeitsüberprüfung durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Sicherheit gegen abscheren wird das Verhältnis von zulässiger zu vorhandener Spannung berechnet [6].

Die vorhandene Spannung lässt sich mit folgender Formel berechnen:

Mit

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{k_A \cdot M_{\text{bmax}}}{0,1 \cdot d^3} \quad (20)$$

und

$$M_{\text{bmax}} = \frac{F(t_s + 2t_G)}{8} \quad (21)$$

Lässt sich die Sicherheit durch die bereits bekannte Formel

$$s = \frac{\sigma_{\text{bzul}}}{\sigma_{\text{vorh}}} \quad (22)$$

berechnen.

Mit den folgenden Parametern kann durch Einsetzen in die Formel (20), (21) und (22) eine Sicherheit S ermittelt werden. Diese Sicherheit sagt aus, ob der errechnete Durchmesser ausreichend ist.

M_b		Biegemoment
d		Bolzendurchmesser
σ_{vorh}		Vorhandene Spannung
σ_{bzul}	186 N/mm ²	Zulässige Biegespannung
t_s	8 mm	Wandstärke der Steife
t_G	4 mm	Wandstärke der Knotenscheibe

Es Folgt ein Biegemoment von:

$$M_{bmax} = 750 \text{ Nmm}$$

Und eine vorhandene Spannung:

$$\sigma_{bvorh} = 71,3 \text{ N/mm}^2$$

Durch die ermittelten Größen kann nunmehr eine Sicherheit von $S = 2,6$ ermittelt werden.

Ein Durchmesser von $d = 4,72 \text{ mm}$ ist ausreichend und würde das Ausreißen des Bauteils verhindern. Der nächste Normdurchmesser liegt bei 5 mm und wird für die nachfolgenden Berechnungen verwendet.

Mit dem Normdurchmesser $d = 5 \text{ mm}$ lässt sich eine Sicherheit $S = 3,1$ bestimmen

Tabelle 11 - Übersicht der Größen zur Bestimmung des geeigneten Bolzendurchmessers

d	σ_{bvorh}	M_{bmax}	S
4,72 mm	$71,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	750 Nmm	2,6
5 mm	$60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	750 Nmm	3,1

6.2 Augenstab

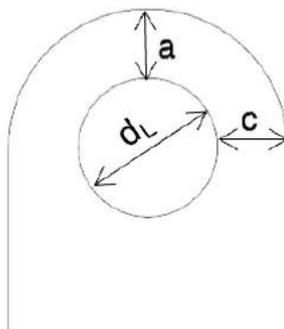


Abbildung 48 - Augenstab

Um zu vermeiden, dass der Bolzen aus der Steife nicht ausreißt, muss das Steifenende ausreichend dimensioniert werden (siehe Abbildung 48). [6]

$$a \geq \frac{F}{2 \cdot t \cdot \frac{R_{p0,2}}{S_M}} + \frac{2}{3} \cdot d_L \quad (23)$$

$$c \geq \frac{F}{2 \cdot t \cdot \frac{R_{p0,2}}{S_M}} + \frac{1}{3} \cdot d_L \quad (24)$$

Mit

$$F = 375 \text{ N} \quad R_{p0,2} = 290 \text{ N/mm}^2$$

$$S_M = 1 \quad d_L = 5 \text{ mm}$$

$$t = 8 \text{ mm}$$

Durch das Einsetzen der Werte in die Formel (23) und (24) folgt eine Scheitelhöhe von $a = 3,41 \text{ mm}$ und eine Wangenbreite von $c = 1,75 \text{ mm}$.

Für die Scheitelhöhe a wird ein Abstand von 5 mm gewählt, da mit einer zusätzlichen Sicherheit gerechnet wird, um weitere Schubfeldträgermodelle flexibel gestalten zu können, ohne dass es zum Ausreißen kommt. Aufgrund einer Steifenbreite von 10 mm und einem Bohrungsdurchmesser von 5 mm ergibt sich eine Wangenbreite von 2,5mm.

6.3 Knotenscheibe



Abbildung 49 - Knotenscheiben-Konstruktion

Um einen möglichst flexiblen Aufbau des Schubfeldträgers zu erreichen, werden zwei unterschiedliche Knotenscheiben konstruiert. Diese werden in Abbildung 49 dargestellt. Die Darstellung auf der linken Seite zeigt eine Knotenscheibe mit einem kreisförmigen Querschnitt. Im rechten Teil des Bildes ist eine Scheibe mit halbrundem Querschnitt dargestellt. Die Verwendung zweier unterschiedlicher Knotenscheiben führt dazu, dass alle Hautfelder, die die gleiche Länge aufweisen sowie unterschiedlich große Hautfelder miteinander verbunden werden können (vgl. Abbildung 50).

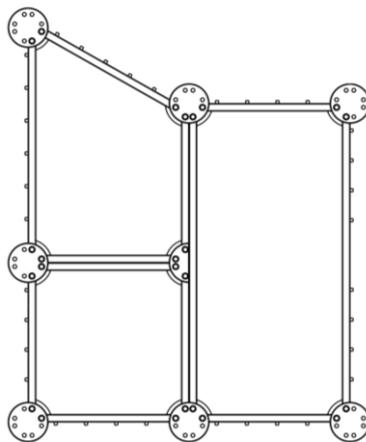


Abbildung 50 - Verbindung der Knotenscheiben mit den Steifen

Anforderungen an die Knotenscheibe:

Nach der Schubfeldtheorie müssen die Steifen gelenkig miteinander verbunden sein, und eine Krafteinleitung muss über die Knotenscheiben erfolgen.

Wegen Verwendung desselben Materials wie bei den Steifen muss der Bereich um die Bohrung die gleiche Materialstärke aufweisen, wodurch die gleichen Dimensionierungen, wie bereits in Kapitel 6.2 berechnet worden, gelten.

6.4 Verbindungsstück der Krafteinleitung und Lager

Für die Krafteinleitung und die Lager (siehe Abbildung 51) wird jeweils ein Verbindungsstück benötigt. Da diese jedoch die gleiche Verbindung zu den Knotenscheiben und Steifen aufweisen, und diese bereits in den vorherigen Abschnitten berechnet wurden, muss kein zusätzlicher Festigkeitsnachweis durchgeführt werden.

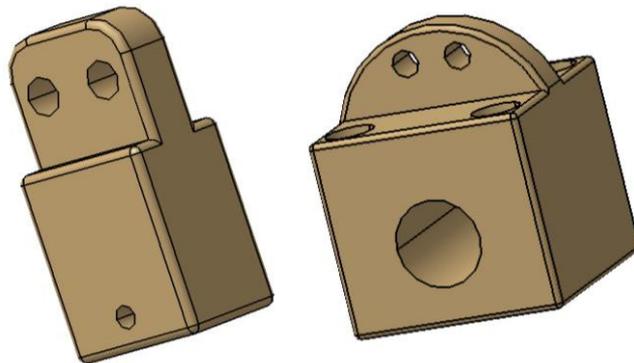


Abbildung 51 - Verbindungsstücke Links: Krafteinleitung; Rechts: Lager

6.5 Welle-Nabe-Verbindung

6.5.1 Steife - Knotenscheibe

Für die in Abbildung 52 Verbindung der Knotenscheibe mit der Steife und dem Bolzen mit einem Durchmesser von 5 mm wird eine Bolzenverbindung einer g6/H7 Passung gewählt. Bei einer solchen Verbindung handelt es sich um eine Spielpassung, wodurch die geforderte gelenkige Lagerung simuliert werden kann. [6][10]

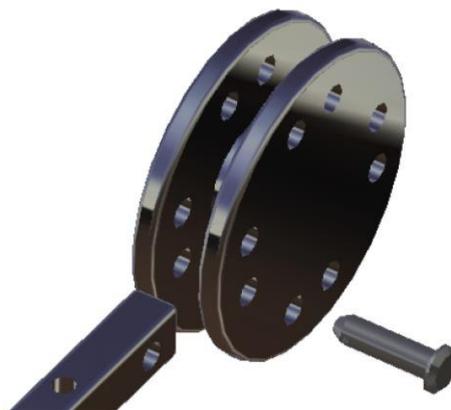


Abbildung 52 - Verbindung Steife – Knotenscheibe

Tabelle 12 - Toleranzabmessung Steife - Knotenscheibe mit Bolzen

Bolzen	Grenzabmaß (μm)	Bohrung	Grenzabmaß (μm)	Mindest-Spiel P_{SM} (μm)	Höchst-Spiel P_{SH} (μm)
g6	-4 / -12	H7	0/12	4	24

Für das Verbindungsstück des Lagers sowie die Krafteinleitung werden die gleichen Toleranzabmessungen, wie in Tabelle 12 dargestellt, verwendet.

6.5.2 Befestigungselemente der Steifen – Stift

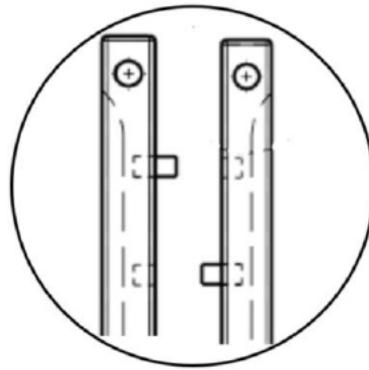


Abbildung 53 - Verbindung Befestigungselement Stift

Für den Stift mit dem Durchmesser von 4mm wird auch in diesem Beispiel eine g6/H7 Passung gewählt (siehe Abbildung 53). Die Teile lassen sich leicht, aber ohne merkliches Spiel gegenseitig verschieben und verdrehen. Die Verschiebung sowie auch die Verdrehung werden durch die Bolzen in den Knotenscheiben verhindert.

Tabelle 13 - Toleranzabmessung Stift - Bohrung

Bolzen	Grenzabmaß (μm)	Bohrung	Grenzabmaß (μm)	Minimum Spiel P_{SM} (μm)	Höchst Spiel P_{SH} (μm)
g6	-4 / -12	H7	0/12	4	24

6.6 Festigkeitsnachweis Fertigungsverfahren - Kleben

In der Verbindungstechnik gehört Kleben zu den geeigneten Verfahren. Allerdings gehören Klebeverbindungen zu den unlösbaren Verbindungen und daher zu den Bauteilen, bei denen die Verbindung nicht ohne Zerstörung der Klebeschicht bzw. des Bauteils gelöst werden kann.

In der Verbindungstechnik gehört das Kleben zu einem geeigneten Verfahren. Dieses Verfahren wird genutzt um, anstelle von mechanischer Verbindungen, die eine Bohrung erfordern, eine geeignete

Alternative zu finden. Dennoch gehören Klebeverbindungen zu den unlöslichen Verbindungen und somit zu Bauteilen, bei denen ohne Zerstörung der Klebeschicht bzw. des Bauteils die Verbindung nicht gelöst werden können. [6]

Da heutzutage in der Luft- und Raumfahrt der Schwerpunkt immer mehr auf die Gewichtsreduktion liegt, werden sowohl unterschiedliche Konstruktionen und Verfahren entwickelt, die dazu beitragen.

Die Steifen eines Schubfeldträgers müssen über die gesamte Steifenlänge mit den Hautfeldern verbunden sein. Eine kontinuierliche, kraftschlüssige Verbindung kann durch Klebung erreicht werden.

Bei Beanspruchung der Konstruktion wird die Verbindung durch Scherung belastet. Deswegen muss eine Überlappungslänge, wie in Abbildung 54 dargestellt, berechnet werden, auf die aufbauend ein Festigkeitsnachweis durchgeführt werden kann [6].

Im Mechanik Labor wurde bereits am Vorgängermodell ein Schubfeldträger mit einer Klebeverbindung gefertigt und auf die Belastbarkeit überprüft. Aus diesem Grund wird der bereits getestete Kleber für das in dieser Masterarbeit entwickelte SFT Modell ebenfalls vorgesehen. Es handelt sich um den Kleber: LOCTITE 3090 [12]. Dieser weist folgende Kriterien auf, mit denen die Überlappungslänge ermittelt werden kann. Das Datenblatt zum Klebstoff befindet sich im Anhang C.

- Topfzeit: 90-180sec bei 25°C
- Spaltdicken von 0,05 mm-2 mm möglich
- Handfestigkeit nach wenigen Minuten, komplett ausgehärtet nach 24 h
- Scherzugfestigkeit auf Aluminium, nach einer Aushärtezeit von 24 h: $\tau_b = 9 \text{ N/mm}^2$

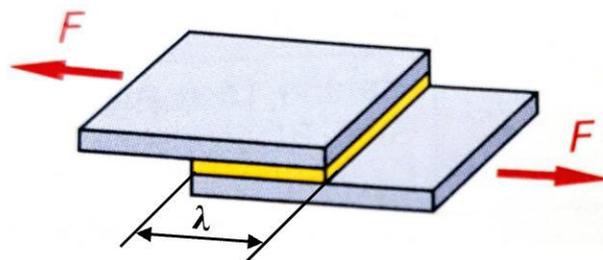


Abbildung 54 - Überlappungslänge einer Klebeverbindung [6]

Die Überlappungslänge lässt sich aus dem Überlappungsverhältnis \ddot{u} und der Bauteildicke ermitteln.

$$\lambda = \ddot{u} \cdot t_{min} \quad (25)$$

Damit die Klebeschicht der eingeleiteten Kraft standhält, muss die Festigkeit der Klebung gleich der Festigkeit der Bauteilfestigkeit entsprechen.

$$F_S = F_{BK} \quad (26)$$

mit

$$F_S = R_e \cdot b \cdot t_{min} \quad (27)$$

und

$$F_{BK} = \tau_B \cdot \ddot{u} \cdot t_{min} \cdot b \quad (28)$$

folgt durch einsetzen in die Formel (26)

$$\ddot{u} = \frac{R_e}{\tau_B} \quad (29)$$

Mit den bereits bekannten Festigkeitswerten von Blech und Kleber

- $R_e = 80 \text{ N/mm}^2$ (Streckgrenze vom Blech) und
- $\tau_B = 9 \text{ N/mm}^2$ (Schubspannung Kleber)

wird das Überlappungsverhältnis von $\ddot{u} = 8,89$ berechnet und kann in die Formel (25) eingesetzt werden. Somit kann bei einer Blechdicke von $t = 0,8 \text{ mm}$ eine Überlappungslänge von $\lambda = 7,112 \text{ mm}$ ermittelt werden.

Gewählt wird eine Überlappungslänge von $\lambda = 8 \text{ mm}$, welche sich auf beide Seiten des Bleches bezieht, da der Kleber an der Unter- und Oberseite haftet.

Nun wird der Spannungsnachweis durchgeführt.

$$\tau = \frac{F}{A} \leq \tau_{zul} \quad (30)$$

Die zulässige Schubspannung lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$\tau_{zul} = \frac{\tau_B}{\nu} \quad (31)$$

Mit

$\nu = 2 \dots 3$ (statisch) und

$\nu = 3 \dots 10$ (dynamisch)

$\tau_B = 9 \text{ N/mm}^2$

lässt sich durch einsetzen in Formel (31) eine zulässige Schubspannung von $\tau_{zul} = 3 \dots 4,5 \text{ N/mm}^2$ ermitteln.

Zur Einhaltung des Kriteriums in Formel (30) muss die vorhandene Schubspannung kleiner sein als die zulässige.

$$\tau_{vorh} = \frac{F}{A_{erf}} \quad (32)$$

Mit

$F =$ die maximale Steifenkraft = 375 N und

$A_{erf} =$ die Klebefläche von 8 mm x 198 mm = 1584 mm folgt eine vorhandene Schubspannung von $\tau_{vorh} = 0,236 \text{ N/mm}^2$.

Sowie $A_{erf} =$ die Klebefläche von 8 mm x 298 mm = 2384 mm folgt eine vorhandene Schubspannung von $\tau_{vorh} = 0,157 \text{ N/mm}^2$.

Das Kriterium für die kürzeste Steife ist somit erfüllt, denn $\tau_{vorh} = 0,236 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_{zul} = 3 \dots 4,5 \text{ N/mm}^2$. Auch bei der längsten Steife wird das Kriterium erfüllt. Es folgt $\tau_{vorh} = 0,157 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_{zul} = 3 \dots 4,5$.

7 Schubfeldträgermodell II

7.1 Berechnung der inneren Kräfte des Schubfeldträgermodells

Zur Berechnung eines weiteren Modells wird der folgende Aufbau durchgerechnet (siehe Abbildung 55). Dabei wird der Schubfeldträger nicht wie im Beispiel zuvor als Kragarm dargestellt, sondern am Knotenpunkt B durch ein Loslager und am Knotenpunkt C durch ein Festlager gelagert. Die Lasteinleitung erfolgt über den Knotenpunkt H.

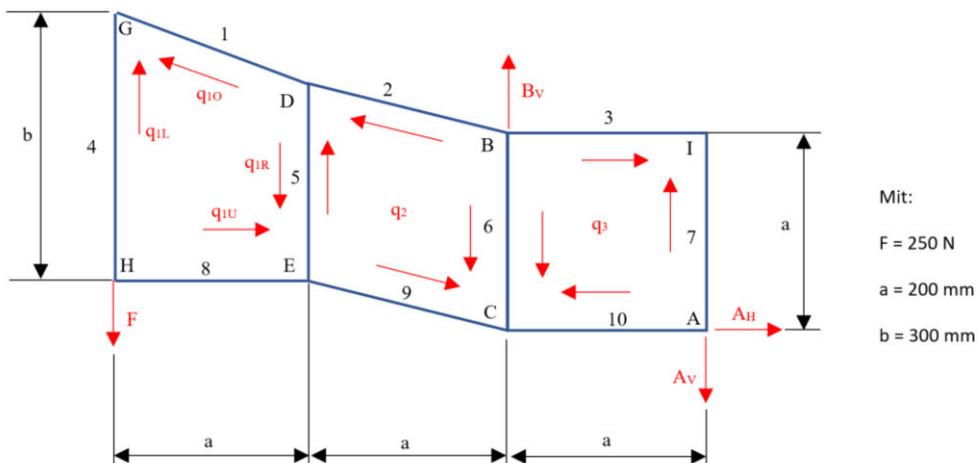


Abbildung 55 - a) Ebener Schubfeldträger und b) Freikörperbild des Schubfeldträgers

Auch bei diesem Modell (siehe Abbildung 56) wird das selbe Konzept genutzt wie beim Modell aus Kapitel 5. Für die Lasteinleitung wird das selbe Verbindungsstück verwendet wie für das SFT Modell I (siehe Kapitel 6.4). Bei den Lagern jedoch wird eine Verlängerung benötigt, damit die Lager an dem Teststand angebracht werden können.

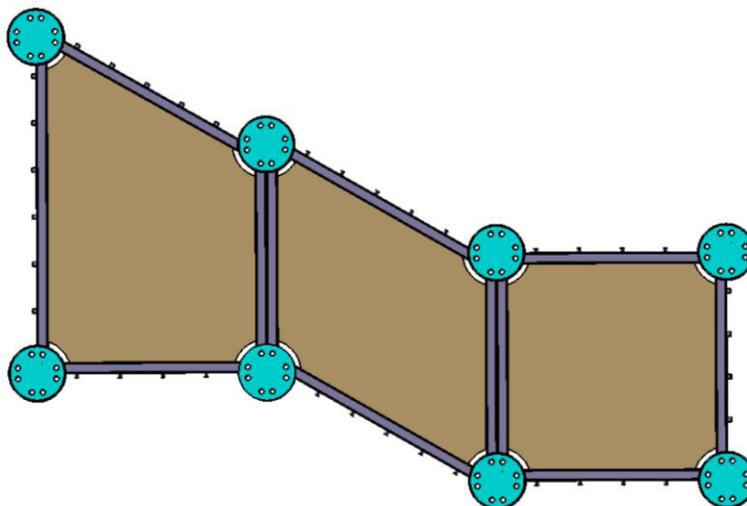


Abbildung 56 - Schubfeldträger-Modell 2

1. Überprüfung der statischen Bestimmtheit

Mit Hilfe der Formel (1) kann zunächst die statische Bestimmtheit des Systems ermittelt werden und ergibt:

$U=0 \rightarrow$ Das System ist statisch bestimmt.

2. Berechnung der unbekanntenen Lasten sowie die Erkennung von Nullstäben

Zunächst müssen die Lagerreaktionen ermittelt werden, damit man mit der Erkennung der Nullstäbe fortfahren kann. Somit ergibt sich aus der Momenten Gleichung um den Knotenpunkt A eine Lagerkraft von $B_V=750\text{N}$. Durch die Summe aller Kräfte in vertikaler Richtung folgt für das Lager am Knoten A eine Lagerkraft in vertikaler Richtung von $A_V=500\text{N}$ und in horizontaler Richtung von $A_H=0$.

Tabelle 14 - Übersicht der erkennbaren Nullstäbe sowie Normalkräfte der Steifen

N_{1L}	N_{3R}	N_{4o}	N_{4u}	N_{5o}	N_{7o}	N_{7u}	N_{8L}	N_{10R}
0	0	0	250 N	0	0	500 N	0	0

Durch der in Tabelle 14 erkannten Lasten können durch das Freischneiden der Steifen 3, 7 und 10 folgende Steifenkräfte ermittelt werden:

Steife 7:
$$q_3 = \frac{2F}{a} = \frac{5 \text{ N}}{2 \text{ mm}}$$

Steife 3:
$$N_{3L} = 2F = 500 \text{ N}$$

Steife 10:
$$N_{10L} = -2F = -500 \text{ N}$$

Durch die Kräftegleichgewichte am Knoten C und am Knoten B können weitere Steifenkräfte ermittelt werden:

Knoten C:
$$N_{9R} = \frac{-2F}{\cos \alpha} = -559 \text{ N}$$

Mit $\alpha = 26,565^\circ$

$$N_{6u} = 250 \text{ N}$$

Knoten B:
$$N_{2R} = 559 \text{ N}$$

$$N_{6o} = 1000 \text{ N}$$

Das Freischneiden der Steifen 6, 2, 9, den Gleichgewichtsbedingungen am Knoten E sowie der Steifen 4 und 5 können nun auch die letzten Steifenkräfte sowie Schubflüsse ermittelt werden.

Steife 6:
$$q_2 = \frac{5 \text{ N}}{4 \text{ mm}}$$

Steife 2:
$$N_{2L} = N_{1R} = 280 \text{ N}$$

Steife 9:
$$N_{9L} = -839 \text{ N}$$

Knoten E:
$$N_{8R} = -750 \text{ N}$$

$$N_{5u} = -375 \text{ N}$$

Steife 4:
$$q_{1L} = \frac{5 \text{ N}}{6 \text{ mm}}$$

Steife 5:
$$q_{1R} = \frac{5 \text{ N}}{2 \text{ mm}}$$

Eine Ermittlung der Schubflüsse aus dem Trapezfeld ergibt mittels Anwendung der Formel (2) einen mittleren Schubfluss von $q_{1m}=1,44 \text{ N/mm}$.

7.1.1 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Lastangriffspunkt

Durch die Berechnung der virtuellen Steifenlast am Lastangriffspunkt Knoten H, kann mit Hilfe der Formeln (3) – (5) die Verschiebung berechnet werden (siehe Abbildung 57).

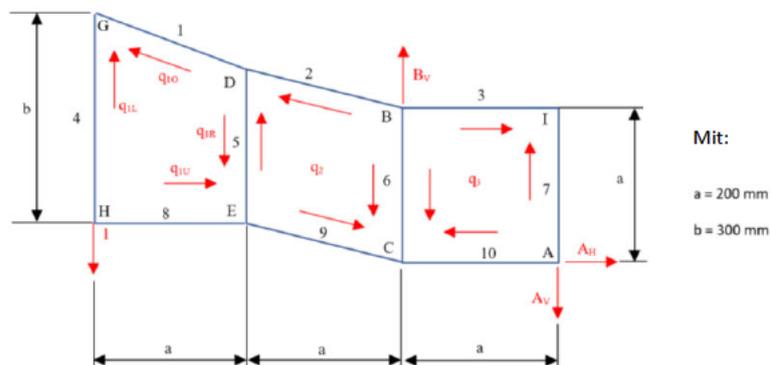


Abbildung 57 - Freikörperbild 1-System (Lastangriffspunkt - Knoten H)

Tabelle 15 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Lastangriffspunkt

N_{1L}	0	N_{7O}	0
N_{1R}	1,12	N_{7U}	2
N_{2L}	1,12	N_{8L}	0
N_{2R}	2,24	N_{8R}	-1
N_{3L}	2	N_{9L}	-1,12
N_{3R}	0	N_{9R}	-2,24
N_{4O}	0	N_{10L}	-2
N_{4U}	1	N_{10R}	0
N_{5O}	0	q_{1m} (in 1/mm)	1/200
N_{5U}	-1/2	q_2 (in 1/mm)	1/200
N_{6O}	4	q_3 (in 1/mm)	1/100
N_{6U}	1		

Mit den Normalkraftverläufen beider Systeme (siehe Abbildung 58), kann durch die PvK Berechnung mit Hilfe der Koppeltafel (Abbildung 37) zur Integration die Verschiebung am Lastangriffspunkt F ermittelt werden.

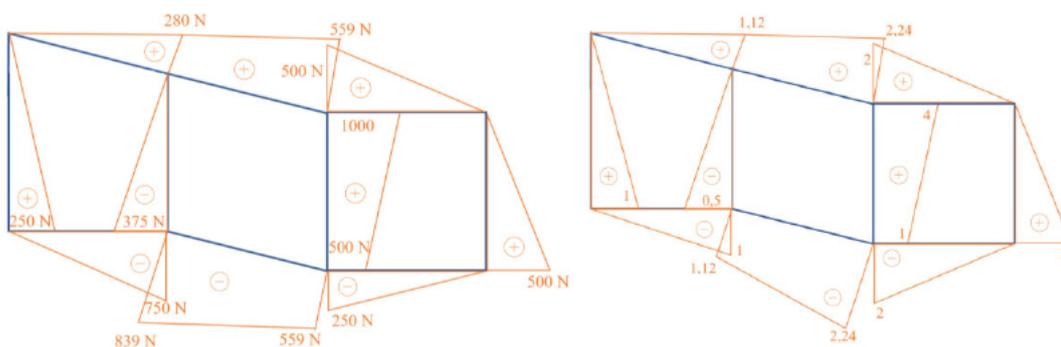


Abbildung 58 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf

Zunächst muss der Ersatzflächeninhalt des Parallelogramms ermittelt werden. Für den Trapez wird, wie bereits in Kapitel 5.1.1., der selbe Ersatzflächeninhalt $A^*=56410 \text{ mm}^2$ verwendet. Mit dem Winkel $\alpha = 26,565^\circ$, folgt ein:

$$A^* = A \cdot \left(1 + \frac{2}{1+\nu} \tan^2 \alpha\right) = 55385 \text{ mm}^2 \quad (33)$$

Unter Verwendung der ermittelten Größen und der Koppeltafel zur Integration erhält man schließlich eine Verschiebung am Kraftangriffspunkt von $f_{HV}=0,351 \text{ mm}$.

7.1.2 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Knotenpunkt G

Um durch einen Vergleich festzustellen, an welchem Bereich die höchste Verschiebung auftritt, wird mit den Formeln (3) – (5) und (33) die Verschiebung auch am Knotenpunkt G berechnet (siehe Abbildung 59).

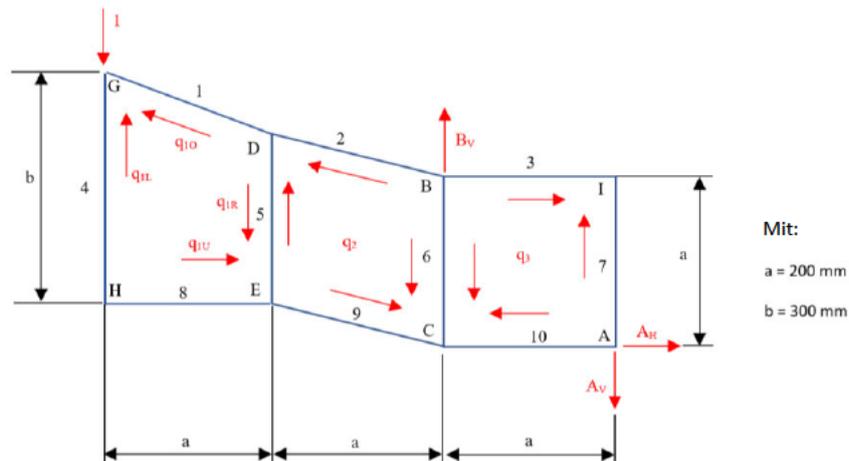


Abbildung 59 - Freikörperbild 1-System (Knotenpunkt G)

Tabelle 16 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Knotenpunkt G

N_{1L}	0	N_{7O}	0
N_{1R}	1,12	N_{7U}	2
N_{2L}	1,12	N_{8L}	0
N_{2R}	2,24	N_{8R}	-1
N_{3L}	2	N_{9L}	-1,12
N_{3R}	0	N_{9R}	-2,24
N_{4O}	-1	N_{10L}	-2
N_{4U}	0	N_{10R}	0
N_{5O}	0	q_{1m} (in 1/mm)	1/200
N_{5U}	-1/2	q_2 (in 1/mm)	1/200
N_{6O}	4	q_3 (in 1/mm)	1/100
N_{6U}	1		

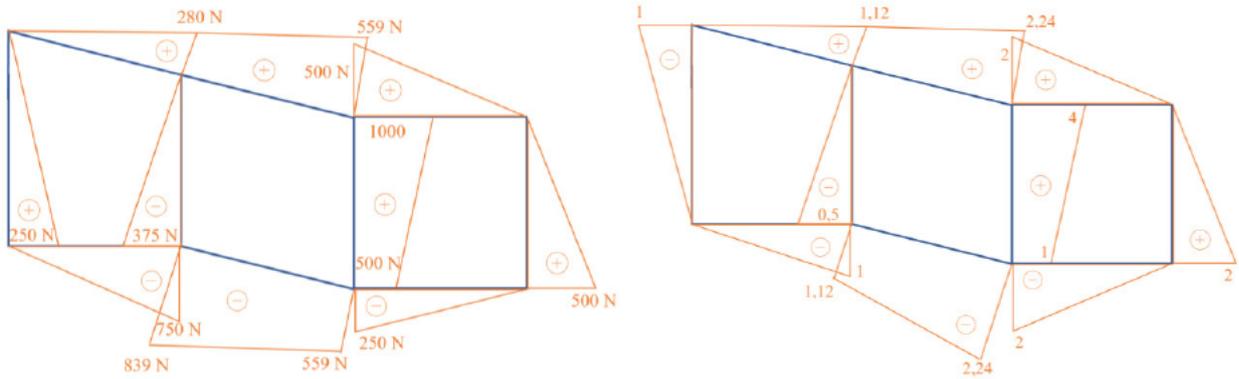


Abbildung 60 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf

Mit den Formeln (3) – (5) und dem Ersatzflächeninhalt des Trapezes sowie des Parallelogramms aus Formel (33) kann nunmehr die Verschiebung am Knotenpunkt G berechnet werden. Durch Einsetzen der Größen wird eine Verschiebung von $f_{GV}=0,347 \text{ mm}$ ermittelt.

7.1.3 Berechnung der vertikalen Verschiebung am Knotenpunkt E

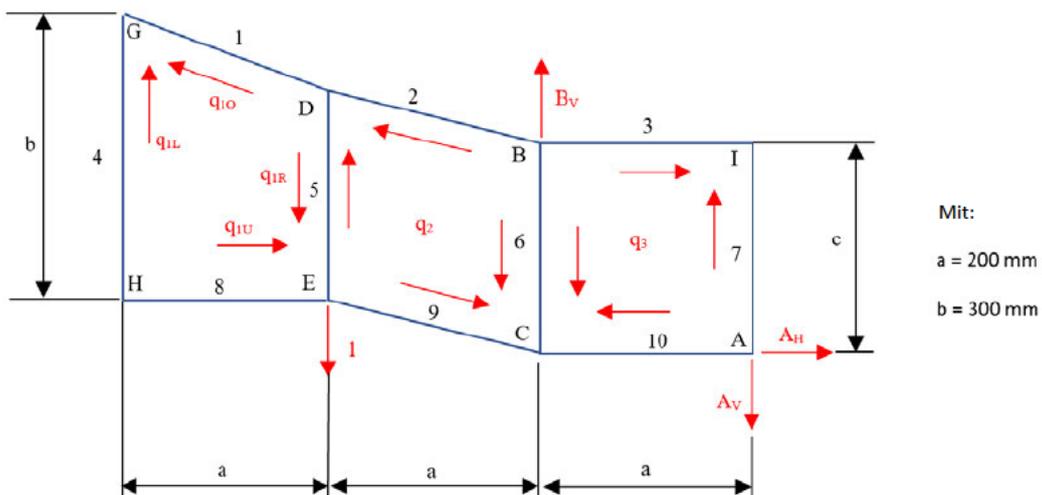


Abbildung 61 - Freikörperbild 1-System (Knotenpunkt E)

Tabelle 17 - Übersicht der virtuellen Normalkräfte und Schubflüsse am Knotenpunkt E

N_{1L}	0	N_{70}	0
N_{1R}	$1/500$	N_{7U}	1
N_{2L}	$1/500$	N_{8L}	0
N_{2R}	1,12		N_{8R}
N_{3L}	1	N_{9L}	$-1/500$
N_{3R}	0	N_{9R}	$-1,12$
N_{40}	0		N_{10L}
N_{4U}	0	N_{10R}	0
N_{50}	0	q_{1m} (in 1/mm)	0
N_{5U}	1	q_2 (in 1/mm)	$1/200$
N_{60}	$5/2$	q_3 (in 1/mm)	$1/200$
N_{6U}	$1/2$		

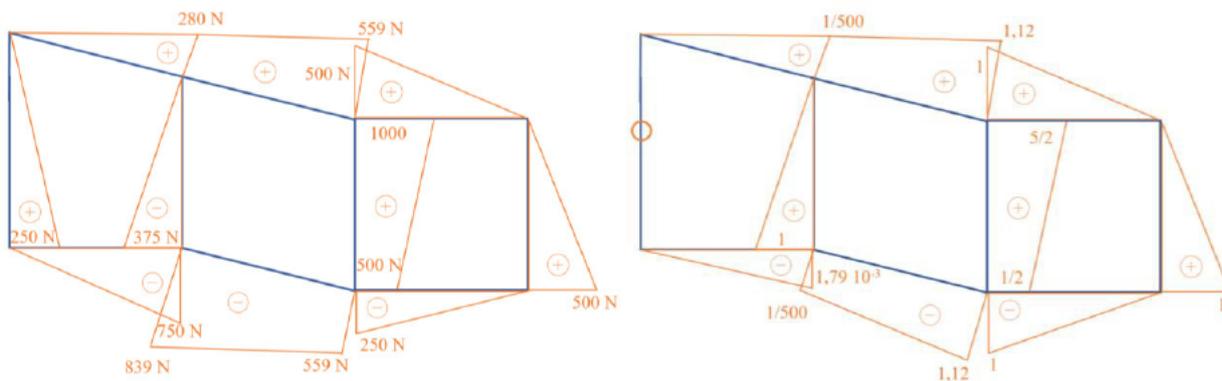


Abbildung 62 - Links: 0-System - Normalkraftverlauf; Rechts: 1-System: Normalkraftverlauf

Mit den Formeln (3) – (5) und dem Ersatzflächeninhalt des Parallelogramms aus Formel (33) kann nunmehr die Verschiebung am Knotenpunkt E berechnet werden. Durch Einsetzen der Größen wird eine Verschiebung von $f_{EV}=0,159 \text{ mm}$ ermittelt.

7.1.4 Zusammenfassung der Verschiebung an den Knotenpunkten

Durch Berechnung der Verschiebung kann der Bereich ermittelt werden, an dem die maximale Verschiebung auftritt (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18 - Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Verschiebung

Kraftangriffspunkt (Knoten H)	$f_{HV} = 0,351 \text{ mm}$
Knoten G	$f_{GV} = 0,347 \text{ mm}$
Knoten E	$f_{EV} = 0,159 \text{ mm}$

7.2 Stabilitätsnachweis

7.2.1 Euler Knicken

Aufgrund der hohen Steifenlasten von $N_{60}=1000 \text{ N}$ wird für das Modell ein weiterer Stabilitätsnachweis durchgeführt. Mit Verwendung der Formeln (6) – (11) kann die Sicherheit gegen Knicken ermittelt werden [8]. Dazu wird der Euler-Fall mit Hilfe der Abbildung 41 bestimmt.

Für die Ermittlung, ob die Steife versagt, muss zunächst der Betrag der Normalspannung der Proportionalitätsgrenze $R_{p0,2}$ gegenübergestellt werden.

$$17,12 \frac{N}{\text{mm}^2} < 240 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Durch das Einsetzen der Größen in die Formeln (9) - (11) und anschließend in Formel (8), folgt:

Tabelle 19 - Größen zur Berechnung der Knicksicherheit

sk = l	I	F _{nenn}	F _{crit}	S
200 mm	403,3 mm ⁴	1000 N	6965,7 N	6,97

7.2.2 Beulen

Wegen der hohen Schubflüsse im SFT Modell II werden die Hautfelder mit Hilfe der Formeln (15) – (18) auf Beulen untersucht. Mit Hilfe der Abbildung 44 ergeben sich für die drei Hautfelder folgende Werte:

Tabelle 20 - Übersicht über die Sicherheitswerte bezüglich des Beulens

	Hautfeld Quadrat/	Hautfeld Parallelogramm	Hautfeld Trapez
k_{τ}	9,1	8,8	6,3
k_{τ}^*	8,2	8	5,6
q	$5/2 \frac{N}{mm}$	$5/4 \frac{N}{mm}$	$1,44 \frac{N}{mm}$
τ_{crit}	$9,18 \frac{N}{mm^2}$	$9 \frac{N}{mm^2}$	$6,27 \frac{N}{mm^2}$
τ_{vorh}	$3,125 \frac{N}{mm^2}$	$1,56 \frac{N}{mm^2}$	$1,8 \frac{N}{mm^2}$
S	2,94	5,8	3,5

7.3 Festigkeitsnachweis

7.3.1 Bolzen

Mit der Formel (19) und den Konstanten aus Kapitel 6.1 folgt mit einem $F_{nenn} = 1000$ N ein Durchmesser von

$$d = 3,71 \text{ mm}$$

Zur Überprüfung ob ein Mindestdurchmesser von $d=3,71$ mm ausreichend ist, muss eine Festigkeitsüberprüfung mit den Formeln (20) – (22) durchgeführt werden. Für die Sicherheit wird das Verhältnis von zulässiger zu vorhandener Spannung berechnet. [6]

Tabelle 21 - Übersicht der Größen zur Bestimmung des geeigneten Bolzendurchmessers

d	$\sigma_{b \text{ vorh}}$	$M_{b \text{ max}}$	S
3,71 mm	$391,66 \text{ N/mm}^2$	2000 Nmm	0,475
4 mm	$312,5 \text{ N/mm}^2$	2000 Nmm	0,56
5 mm	160 N/mm^2	2000 Nmm	1,16

So wie beim Schubfeldträgermodell I in Kapitel 6.1 reicht ein Bolzendurchmesser von 5 mm und wird für die folgenden Berechnungen angewendet.

7.3.2 Augenstab

Um sicherzustellen, dass der Bolzen an den Steifen nicht ausreißt, erfolgt die Überprüfung mit den Formeln (23) und (24) des Augenstabs. [6]

Mit den in Tabelle 22 dargestellten Größen

Tabelle 22 - Übersicht der Größen zur Bestimmung der Scheitelhöhe und Wangenbreite

F_{nenn}	1000 N
$R_{p0,2}$	$290 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
d_L	5 mm
S_M	1
t	0,8

ergibt sich eine Scheitelhöhe des Augenstabs von:

$$a = 3,55 \text{ mm}$$

und eine Wangenbreite von:

$$c = 1,88 \text{ mm}$$

Auch wie beim Schubfeldträgermodell I, wird eine Scheitelhöhe von $a = 5 \text{ mm}$ und eine Wangenbreite von $c = 2,5 \text{ mm}$ gewählt.

7.4 Zusatzteile

Das Schubfeldträgermodell II wird anders als das Schubfeldträgermodell I nicht als Kragarm ausgeführt. Aus diesem Grund werden weitere Zusatzteile für die Lagerverbindungen benötigt. Dabei handelt es sich um Säulen, die man mit dem Verbindungsstück verschrauben kann (Siehe Abbildung 63). Im Mechanik Labor der HAW existiert bereits eine Säule (SE110.29), die für den Teststand verwendet werden kann. Bei dieser Säule müssen lediglich auf der Ober- und Unterseite jeweils vier Bohrungen für die Befestigung am Rahmen sowie für die Befestigung am Verbindungsstück gesetzt werden. Für das Loslager wird jedoch eine Verlängerung benötigt, die in der geforderten Länge nicht vorhanden ist, sodass sie konstruiert werden muss. Im Anhang A sind die technischen Zeichnungen dazu zu finden.

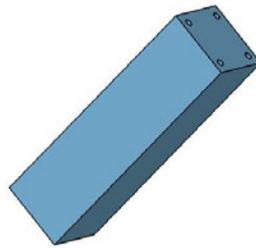


Abbildung 63 - Säule für die Lagerverlängerung

8 Schubfeldträger mit Störbelastung

Im Falle einer Störung im System des Schubfeldträgers müssen die Kräfte an den Bereichen der Störung umgeleitet werden. Störungen können auftauchen, sobald Vorrichtungen für die Durchführung von Kabeln oder ähnlichem notwendig sind. Dies ist häufig der Fall bei Kastenträgern, die eine Zugangsöffnung benötigen. Diese müssen durch die Hautfelder hindurchgelegt werden und stellen eine Unterbrechung des Kräfteverlaufs dar. Wird an einem Schubfeldträger ein ganzes Hautfeld entfernt, um eine Durchführung von Kabeln zu ermöglichen, und durch weitere Hautfelder umrandet, kommen bei einer Zugbelastung, wie in Abbildung 64 dargestellt, so resultieren daraus hohe Schubkräfte der Eckfelder, erhöhte Zugbeanspruchung der Berandungssteifen, Druck im ersten und Zug im Zweiten Rippenbar. Zu beachten ist jedoch, dass der Ausschnitt einer Schubwand nicht die gesamte Höhe einnehmen darf, da sonst die Tragfähigkeit verloren geht. In diesem Bereich muss mindestens eine Unterteilung durch eine horizontale Steife erfolgen. [13]

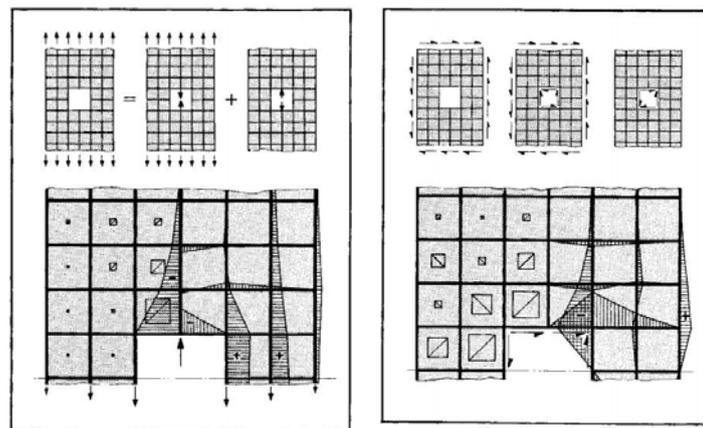


Abbildung 64 - Diskontinuierliches Schubfeldmodell. Links: Störkräfte bei Zugbelastung; Rechts: Störkräfte bei Schubbelastung [13]

Um diese erhöhten Kräfte zu reduzieren, müssen entsprechende konstruktive Maßnahmen vorgenommen werden. Diese lassen sich durch Aufdicken der benachbarten Hautfelder (vor und hinter dem Ausschnitt) sowie durch Verstärkung der Steifen realisieren. [13]

Auf der rechten Seite der Abbildung 64 erfährt der Schubfeldträger eine Schubbelastung. Um die Störung herum treten hohe Schubkräfte auf sowie hohe Druckkräfte an den Randsteifen. Zur Stabilisierung des Systems wird eine Rahmenkonstruktion benötigt, die an allen Seiten aus einem Steifenpaar mit Schubverstärkten Randfeldern – also ebenfalls aus aufgedickten Hautfeldern besteht. [13]

9 Fertigung und Montage

Zur Fertigung des Schubfeldträgers werden im Folgenden die notwendigen Materialien aufgelistet und die Fertigungsart beschrieben. Dabei wird jeweils eine Stückliste für das SFT Modell I und für das SFT II Modell dargestellt. Abbildungen zu den technischen Zeichnung sind in Anhang A zu finden.

9.1 Stückliste Schubfeldträger I

Tabelle 23 - Stückliste SFT I

Bauteil	Anzahl	Herstellung/ Fertigung	Material	Montage
Steife 1	1	Aluminium Stange – Vollprofil: Nut wird nachträglich eingefräst	Aluminium AlMgSi1	Wird durch das Klebeverfahren mit dem Blech verbunden
Steife 2	1			
Steife 3	8			
Steife 4				
Steife 5				
Steife 6				
Steife 9				
Steife 10				
Steife 11				
Steife 12				
Steife 7	2			
Steife 8				
Trapez Blech	1	Aluminium Blech wird zugeschnitten	Aluminium AlMg3	Blech wird durch das Klebeverfahren in die Nut der Steifen geklebt.
Quadrat Blech	1		Aluminium AlMg3	
Rechteck Blech	1		Aluminium AlMg3	

Bauteil	Anzahl	Herstellung/ Fertigung	Material	Montage
Knotenscheibe A	7	Drehteil	Aluminium AlMg3	
Knotenscheibe B				
Knotenscheibe C				
Knotenscheibe D				
Knotenscheibe E				
Knotenscheibe F				
Knotenscheibe G				
Knotenscheibe H	1			
Bolzen	30	Kaufteil	Edelstahl	Bolzen X8CrNiS18-9 nach EN10088 (M5x22)
Verbindung Kraft Schubfeldträger	1	Frästeil	Aluminium AlMgSi1	Bohrungen werden nachträglich gesetzt
Verbindung Lager SFT I	2	Frästeil	Aluminium AlMgSi1	Bohrungen werden nachträglich gesetzt
Stifte	59	Kaufteil	Aluminium AlMgSi1	Aluminiumstange wird auf die Länge zugeschnitten

9.2 Stückliste Schubfeldträger II

Tabelle 24 - Stückliste SFT II

Bauteil	Anzahl	Herstellung/ Fertigung	Material	Montage
Steife 1	3	Aluminium Stange – Vollprofil: Nut wird nachträglich eingefräst	Aluminium AlMgSi1	Wird durch das Klebeverfahren mit dem Blech verbunden
Steife 7				
Steife 8				

Bauteil	Anzahl	Herstellung/ Fertigung	Material	Montage
Steife 2	1	Aluminium Stange – Vollprofil: Nut wird nachträglich eingefräst	Aluminium AlMgSi1	Wird durch das Klebeverfahren mit dem Blech verbunden
Steife 3	8			
Steife 4				
Steife 5				
Steife 6				
Steife 9				
Steife 10				
Steife 11				
Steife 12				
Trapez Blech	1	Aluminium Blech wird zugeschnitten	Aluminium AlMg3	Blech wird durch das Klebeverfahren in die Nut der Steifen geklebt
Quadrat Blech	1			
Parallelogramm Blech	1			
Knotenscheibe A	8	Drehteil	Aluminium AlMg3	Verbindung der Hautfelder – gelenkige Lagerung
Knotenscheibe B				
Knotenscheibe G				
Knotenscheibe I				
Knotenscheibe J				
Knotenscheibe K				
Knotenscheibe L				
Knotenscheibe M				
Bolzen	30	Kaufteil	Edelstahl	Bolzen X8CrNiS18-9 nach EN10088 (M5x22)

Bauteil	Anzahl	Herstellung/ Fertigung	Material	Montage
Verbindung Kraft Schubfeldträger	1	Frästeil	Aluminium AlMgSi1	Bohrungen werden nachträglich gesetzt
Verbindung Lager	2	Frästeil	Aluminium AlMgSi1	Bohrungen werden nachträglich gesetzt
Säule Kurz	1	Bohrungen müssen gemäß technischer Zeichnung gesetzt werden.	SE110.29	Verbindungsteil für die Lager
Säule Lang	1	Aluminium Stange Vollprofil – wird auf Form zugeschnitten	Aluminium	Verbindungsteil für die Lager
Stifte	53	Aluminiumstange wird auf die Länge zugeschnitten - Kaufteil	Aluminium AlMgSi1	Werden in die Bohrungen der Steifen geklebt

9.3 Kostenanalyse

Für die in der Arbeit entworfenen und benötigten Teile, wird in diesem Abschnitt eine Kostenanalyse durchgeführt, um die bevorstehenden Kosten zu planen. In Tabelle 25 sieht man eine Übersicht aller Kosten. Dabei wurde darauf geachtet, dass man so viele Teile kauft, die für den Umbau von einem zum anderen SFT notwendig sind.

Tabelle 25 - Übersicht der bevorstehenden Kosten

Bauteil	Material	Anzahl für Modell	Fertigung	Maße LxBxH (mm)	Anzahl Bestellung	Lieferant	Kosten (€)	Gesamtkosten €
Steife	AlMgSi1	16	Stange - Vollprofil Nut wird nachträglich eingefräst	3000x25x8	1	Geier Metalle&Edelstahl	60,32	60,32
Stift	AlMgSi0,5	77	Stange - Vollprofil Wird auf die Länge zugeschnitten	Ø4x1000	1	https://www.metallstore.de/aluminium/stange-rund/almgsi0-5-aw-6060/826/4-mm-aluminium-rund-almgsi0-5	1,26	1,26
Blech	AlMg3	4	Blech - wird gemäß technischer Zeichnung zugeschnitten	210x210x0,8	1	Metall-kunststoffhandel.de	3,7	17,48
				420x210x0,8	1		5,07	
				310x210x0,8	1		4,35	
				311x210x0,8	1		4,36	
Knotenscheibe (Ganz)	AlMgSi1	8	Drehteil		8	Laserhub.com	21,09	168,72
Knotenscheibe (Halb)	AlMgSi1	1	Drehteil		1	Laserhub.com	139,41	139,41
Verbindung Kraft - Schubfeldträger	AlMgSi1	1	Frästeil		1	shop.spanflug.de	169,79	169,79
Verbindung Lager SFT I	AlMgSi1	2	Frästeil		2	shop.spanflug.de	143,89	287,78
Verbindung Lager SFT II	AlMgSi1	2	Frästeil		2	shop.spanflug.de	126,29	252,58
Säule Kurz		1	Vorhandenes Bauteil SE110.20 - Bohrungen werden gemäß technischer Zeichnung nachträglich	40x40x145	1	https://metall-fachhandel.de/	5,14	5,14
Säule Lang	AlMgSi1	1	Rechteck Vollprofil	40x40x367	1	https://metall-fachhandel.de/	12,08	12,08
M5x22 Bolzen	Edelstahl	30	Kaufteil		30	Vorhandene Teile aus Bachelorarbeit		
M5x50 Schraube mit Schaft	Edelstahl	8	Kaufteil		200	www.proselect-schrauben.de	22,76	22,76
M5x40 Schraube	Edelstahl	8	Kaufteil		200	www.proselect-schrauben.de	12,8	12,8
M5x15 Schraube	Edelstahl	8	Kaufteil		500	www.proselect-schrauben.de	21,88	21,88
LOCTITE 3090	Kleber	1	Wird benötigt um die Teile kontinuierlich miteinander zu verbinden			Voelkner	26,06	26,06
Σ		168						1198,06

10 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit war die Konstruktion und Auslegung eines ebenen Schubfeldträgers für eine experimentelle Analyse an einem Teststand der Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Die Konstruktion und Auslegung des Schubfeldträgermodells diente zur Erstellung der Stücklisten und Planung, in welchen Dimensionen das Modell gefertigt werden kann. Das Konzept des Modells wurde anhand von Analysen erstellt, die auf den Grundlagen der Schubfeldtheorie beruhen. Nach den Analysen konnte das Modell dimensioniert und berechnet werden. Die Schubfeldträger wurden in zwei Formen gefertigt: *Das erste Modell* wurde als Kragarm ausgelegt und konstruiert. Er besteht aus 3 Hautfeldern mit einem Trapezförmigen-, einem quadratischen und einem rechteckigen Schubfeld. Verbunden werden die Steifen und Hautfelder durch Knotenscheiben, die eine gelenkige Lagerung ermöglichen. Ein Zwischenstück für die Verbindung der Lager mit den Knotenscheiben, sowie die Verbindung der Krafteinleitung mit den Knotenscheiben, musste ebenso konstruiert werden. Die Lasteinleitung in den Schubfeldträger soll quasistatisch und rein mechanisch erfolgen. Die Messungen der Verformungen sollen mit Messuhren vorgenommen werden.

Das zweite Modell wurde nicht als Kragarm ausgelegt. Das eine Lager befindet sich am oberen Teil des Modells und das zweite Lager am unteren Teil. Es besteht aus 3 Hautfeldern mit einem trapezförmigen-, einem quadratischen und einem parallelogrammförmigen Schubfeld. Zur Befestigung des Modells mit dem Rahmen des Teststands wurden zwei Säulen zur Verlängerung konstruiert, wobei bereits eine der beiden Säulen im Mechanik Labor existiert. Dieses Teil muss nur noch nachträglich mit Bohrungen versehen werden. Alle in dieser Masterthesis verwendeten Teile wurden als Aluminiumteile dimensioniert. Um die Fertigung jedoch kostengünstiger und einfacher zu gestalten, wurden aus dem 3D Space an der HAW Teile aus dem Kunststoff *Ultrafuse PLA PRO1* (siehe Anhang D) gefertigt, um zu testen, ob die Festigkeit des Materials auch ausreichend ist.

Beim 3D Druck ist jedoch zu beachten, dass die Fertigung mit dem vorhandenen Drucker nicht die geforderten Toleranzen einhalten kann, was zu einem Problem bei der gelenkigen Lagerung führen kann. Das geforderte Mindest- bzw. Höchstspiel kann nicht eingehalten werden, da die Drucker-Toleranzen je nach Ausrichtung nur im Zehntelmilimeterbereich liegen. Demnach müssen die Toleranzen in der CAD Konstruktion bereits Teil der Auslegung sein. Dass die Toleranz am Ende eingehalten wird, ist jedoch nicht garantiert. Des Weiteren ist ersichtlich geworden, dass der 3D-Druck nicht für alle Teile geeignet ist, da das Ergebnis des Drucks zu ungenau ist. Zu diesen Teilen gehören die Steifen, welche durch nachträgliches Nacharbeiten (Schleifen der Stifte, Bohrungen und Nut) ein recht ungenaues Ergebnis erzeugen. Nachfolgend werden die Ergebnisse des 3D-Drucks grafisch dargestellt (siehe Abbildung 65 - Abbildung 67).

Während der Bearbeitung sind mehrere Unterschiede zwischen der Ermittlung der Lasten in der Theorie und der Konstruktion aufgefallen: *Beim Schubfeldträger II* befindet sich bei der Theorie kein Sprung zwischen den Steifen. In der Konstruktion jedoch kann ein Sprung nicht verhindert werden, da dieser aus fertigungstechnischen Gründen nicht anders ausgelegt werden kann. Auch die flexible Gestaltung des Schubfeldträgers ist nicht in jeder Variation möglich. Nur gleich große und doppelt so große Hautfelder können aneinandergesetzt werden. Schräge Steifen (sowie die des Parallelogramms und des Trapezes) können nicht mit einem weiteren Hautfeld verbunden werden, da es mit den Knotenscheiben nicht passt.

Die Verwendung von den bestehenden Verbindungsteilen des Lagers und der Krafteinleitung wurden zunächst vorgesehen. Im Laufe der Bearbeitung wurde aber ersichtlich, dass die Verwendung dieser Teile aufgrund der veränderten Knotenscheibengeometrie unmöglich ist. Trotz der auftretenden Hürden wurde die Aufgabenstellung der Masterarbeit umgesetzt und eine flexible Gestaltung des Schubfeldträgers ermöglicht. Es konnten alle Teile soweit fertiggestellt werden, dass eine Stückliste und die zugehörigen

technischen Zeichnungen erstellt werden konnten. Des Weiteren wurde eine Übersicht der zu erwartenden Kosten aufgestellt. Da die Kostenanalyse zeigt, dass die Fertigungskosten bei einer reinen Aluminiumkonstruktion sehr hoch sind, sollte man auf günstigere Varianten zurückgreifen. Daher lohnt es sich, die Verbindungsteile, die bereits zum Testen in 3D-Druck an der Hochschule gefertigt wurden, für die Endfertigung zu wählen.

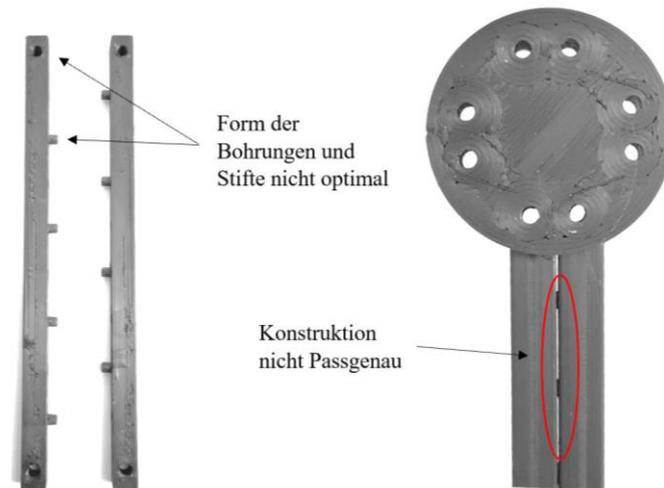


Abbildung 65 - Steifen aus dem 3D-Druck

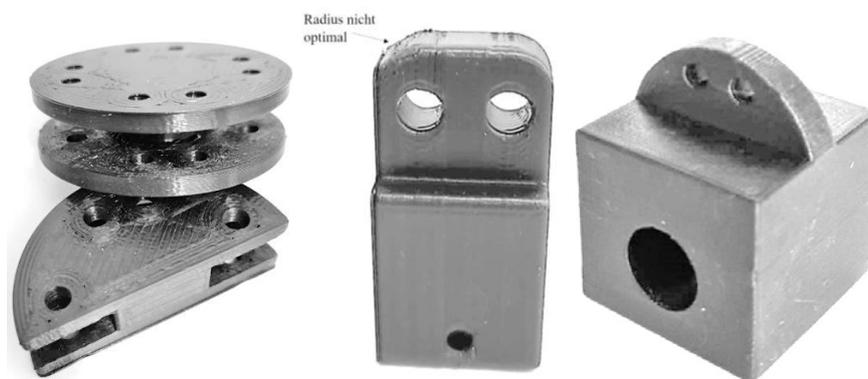


Abbildung 66 - Teile aus dem 3D-Druck (Links: Knotenscheiben; Mitte: Verbindungsstück Lasteinleitung; Rechts: Verbindungsstück Lager)

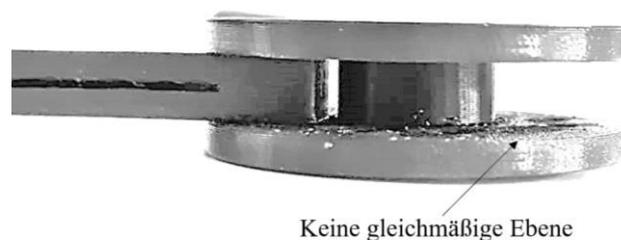


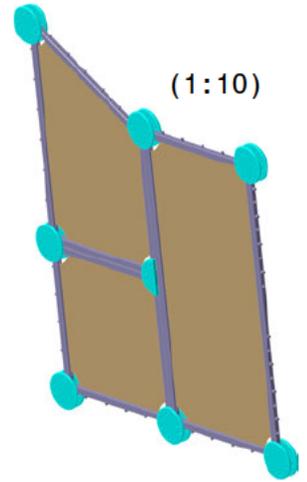
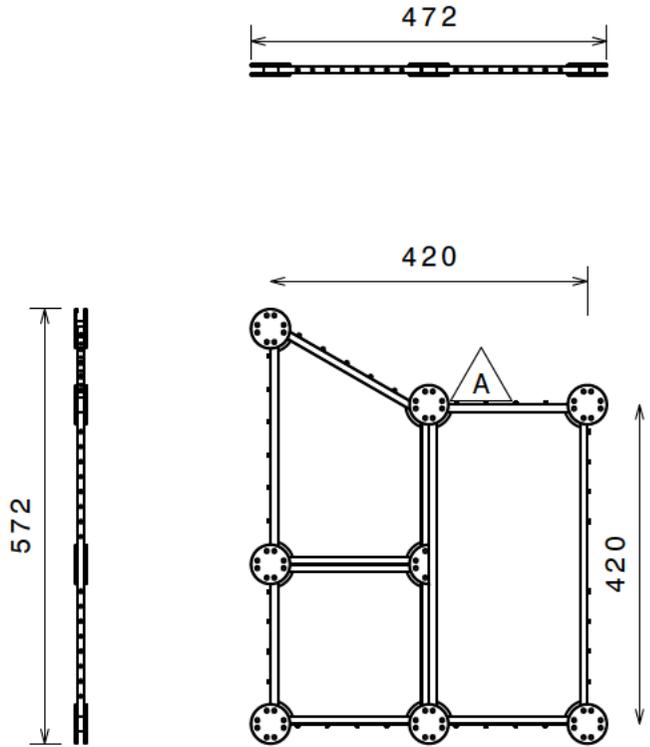
Abbildung 67 - Verbindung der Knotenscheibe und der Steifen

Literaturverzeichnis

- [1] **Abulawi, Prof. Dr. J. 2014.** Konstruktion Maschinenelemente. *Skript*. Hamburg : Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2014.
- [2] **Abulawi, Prof. Dr. J. 2017.** Systems Engineering. *Skript*. Hamburg : Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2017.
- [3] **Daniel.** Mein Weg ins Cockpit. [Online] [Zitat vom: 11. November 2020.] <https://sites.google.com/site/weginscockpit/ueber-mich>.
- [4] **Dubs, F. 1979.** *Aerodynamik der reinen Unterschallströmung*. s.l. : Springer Basel AG, 1979.
- [5] **Ermanni, Prof. Dr. Paolo. 2015.** *Leichtbau*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Swiss Federal Institute of Technology Zürich. Zürich : s.n., 2015. Skript zur Vorlesung.
- [6] **H. Wittel, et al. 2017.** *Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung Berechnung Gestaltung Lehrbuch und Tabellenbuch*. s.l. : Springer Vieweg, 2017. Bd. 23. Auflage.
- [7] **Linke, Prof. Dr. M. 2013.** Technische Mechanik 1. *Skript*. Hamburg : Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2013.
- [8] **Markus Linke, Eckart Nast. 2015.** *Festigkeitslehre für den Leichtbau*. s.l. : Springer Vieweg, 2015.
- [9] **Nast, Prof. Dr. E. 2013.** Festigkeit im Leichtbau. *Skript*. Hamburg : Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2013.
- [10] **U. Fischer, et al. 2011.** *Tabellenbuch Metall 45., neu bearbeitet und erweiterte Auflage*. Haan-Gruiten : Europa Lehrmittel, 2011.
- [11] **von Radow, M. 2018.** Klimaschutz Portal. [Online] Februar 2018. [abgerufen: 2. September 2020.] <https://www.klimaschutz-portal.aero/verbrauch-senken/am-flugzeug/luftwiderstand-verringern/>.
- [12] **Wedel, Tanja. 2016.** *Bachelorarbeit - Konstruktion und Berechnung eines Modells zur experimentellen Spannungsanalyse am Schubfeldträger*. Hamburg : Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2016.
- [13] **Wiedemann, Johannes. 2006.** *Leichtbau - Elemente und Konstruktion 3. Auflage*. s.l. : Springer Vieweg, 2006.

Anhang A – Technische Zeichnungen

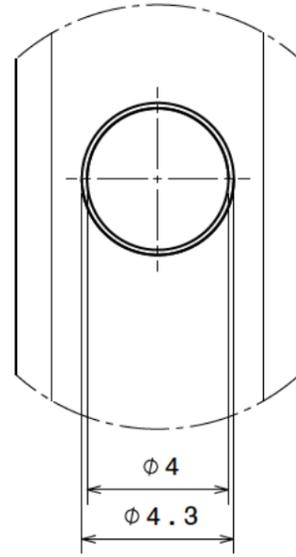
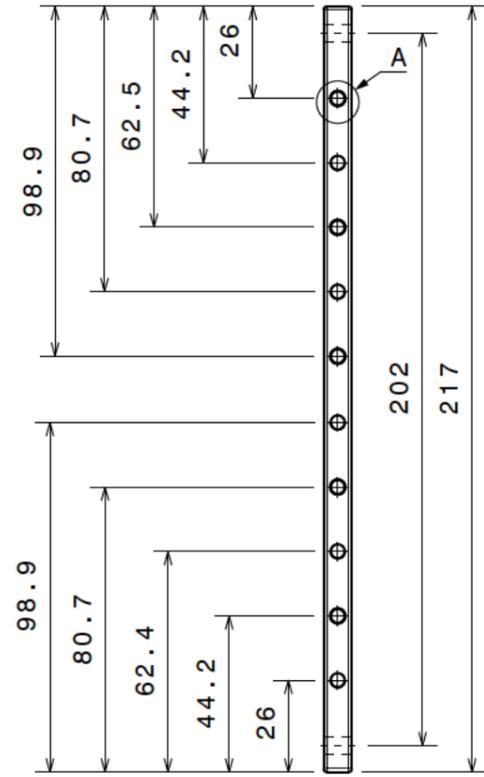
Position: -1 Schubfeldträger Gesamtmodell



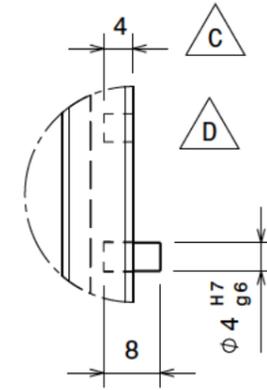
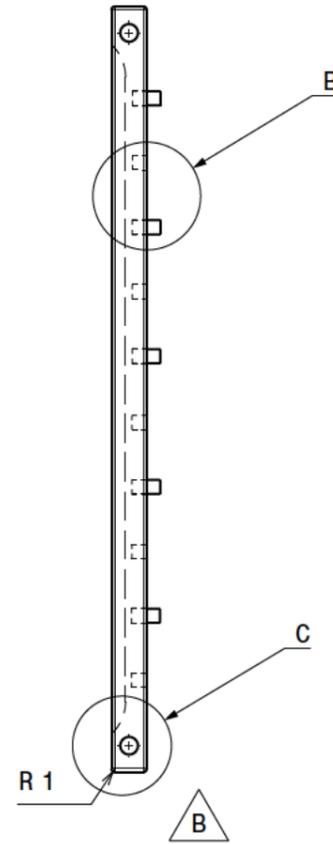
Alle Bleche in der Nut vom Stab mit Loctite 3090 verklebt.

		Masterarbeit Magdalena Rucinski XXXXXXXXXX				
		DRAWING TITLE				
DRAWN BY Magdalena Rucinski		DATE 21.09.2020		Schubfeldträger-Modell I		
CHECKED BY		DATE				
DESIGNED BY Magdalena Rucinski		DATE 21.09.2020		SIZE A4	DRAWING NUMBER	REV 1
		Scale: 1:10		WEIGHT(kg) 1,36	SHEET 1/20	

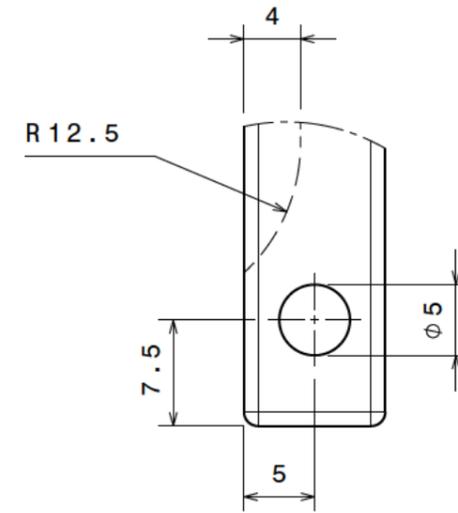
Position: 1 - Steife 1



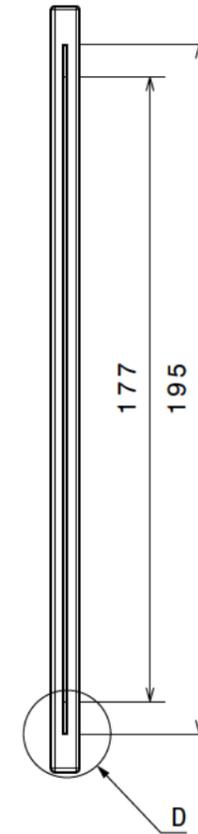
Detail A
Maßstab: 5:1



Detail B
Maßstab: 1:1



Detail C
Maßstab: 2:1



Detail D
Maßstab: 1:1

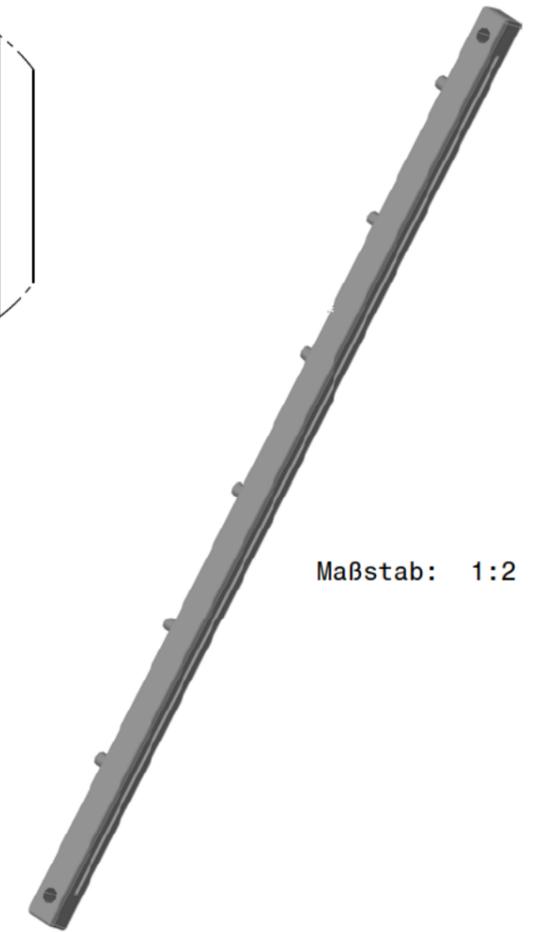
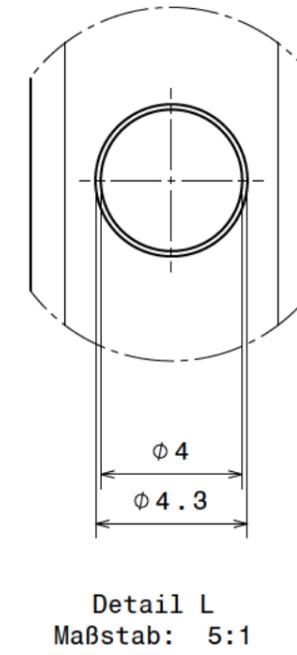
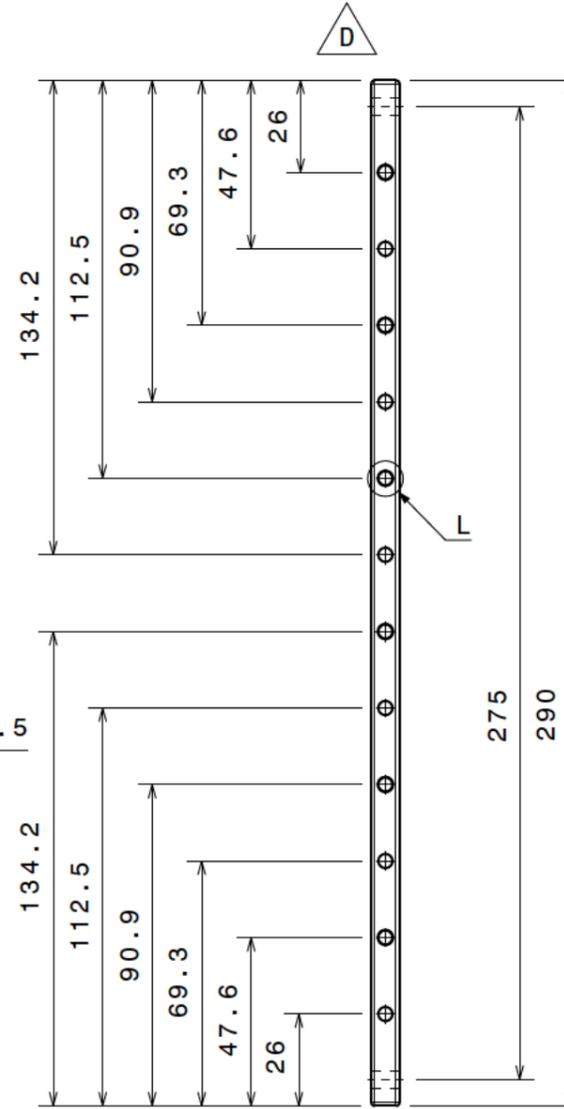
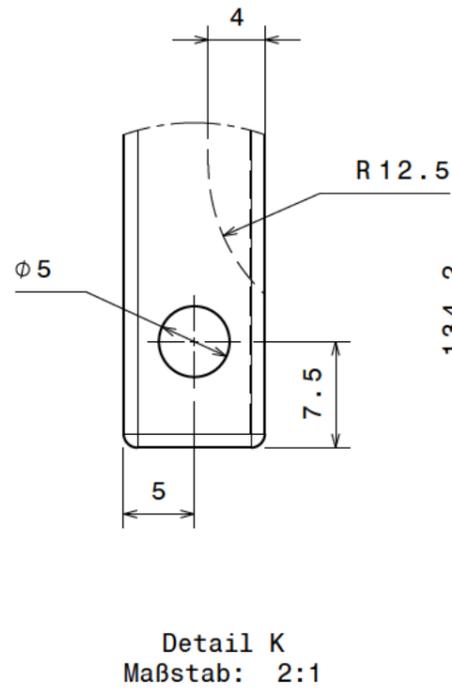
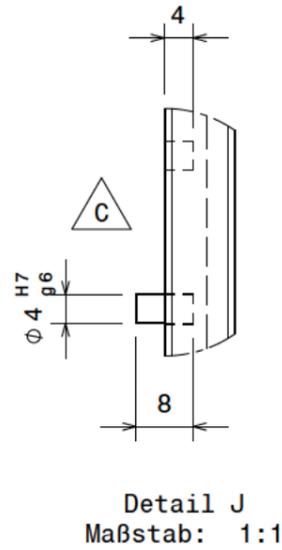
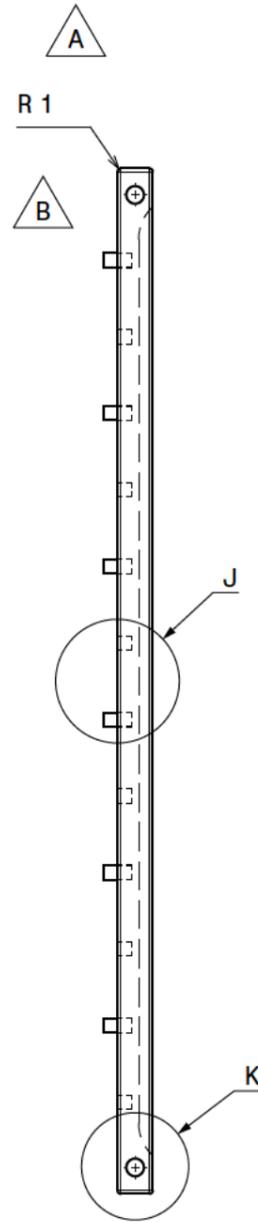
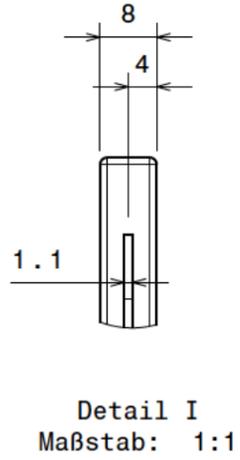
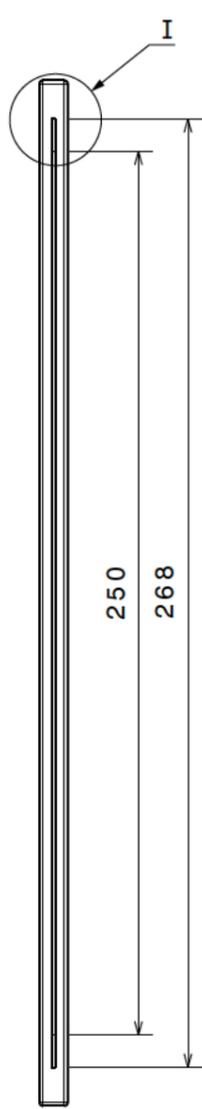


Maßstab: 1:2

-  Abstand der Stifte/Bohrungen bleiben gleich.
-  Radius gilt für alle Ecken
-  Stifte in der Bohrung vom Stab eingeklebt mit Loctite 3090.
-  Befestigungselemente (bestehend aus Stift und Bohrung) werden im Wechsel an die Steifen angebracht.

		Masterarbeit Magdalena Rucinski_			
DRAWN BY		DATE		DRAWING TITLE	
Magdalena Rucinski		21.09.2020		Steife 1	
CHECKED BY		DATE		SIZE	DRAWING NUMBER
				A3	N/A
DESIGNED BY		DATE		SCALE	WEIGHT(kg)
Magdalena Rucinski		21.09.2020		1:2	0,043
				SHEET	2/20
				REV	1

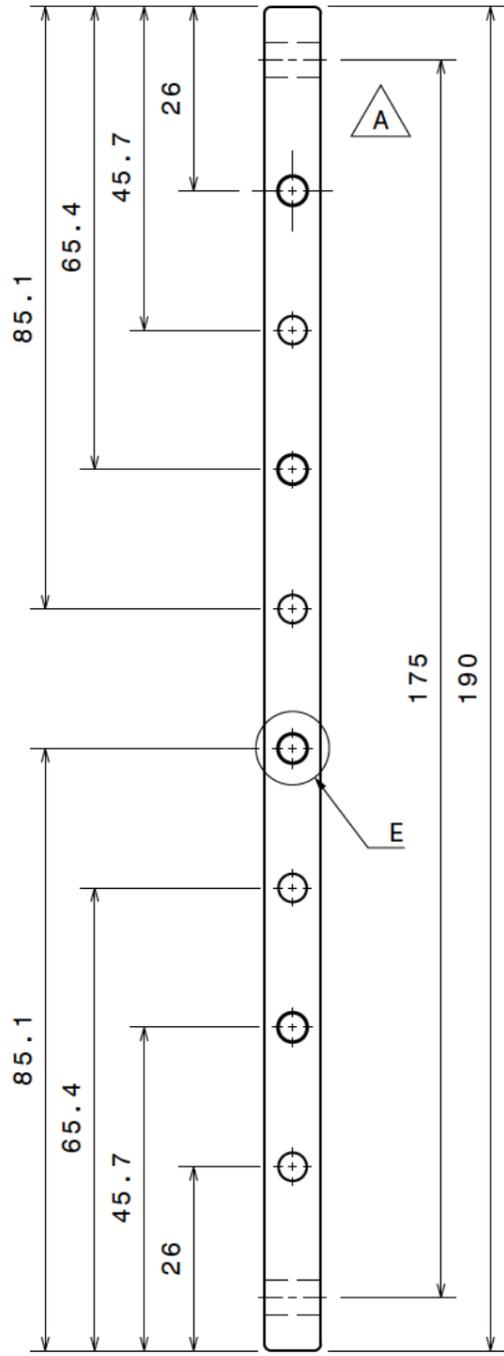
Position: 2 - Steife 2



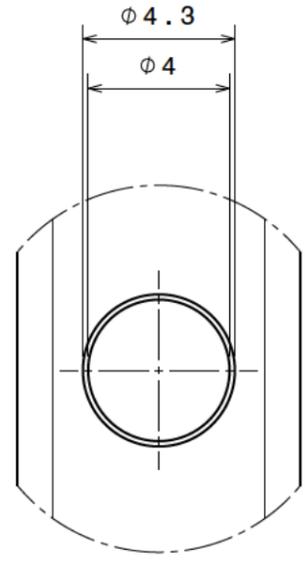
- Befestigungselemente (bestehend aus Stift und Bohrung) werden im Wechsel an die Steifen angebracht.
- Radius an allen Ecken
- Stifte in der Bohrung von der Steife eingeklebt mit Loctite 3090.
- Abstand der Stifte/Bohrungen bleiben gleich.

		Masterarbeit Magdalena Rucinski		
DRAWN BY Magdalena Rucinski		DRAWING TITLE Steife 2		
DATE 21.09.2020		SIZE A3		REV 1
CHECKED BY		DRAWING NUMBER N/A		WEIGHT (kg) 0,058
DESIGNED BY Magdalena Rucinski		SCALE 1:2		SHEET 3/20
DATE 21.09.2020				

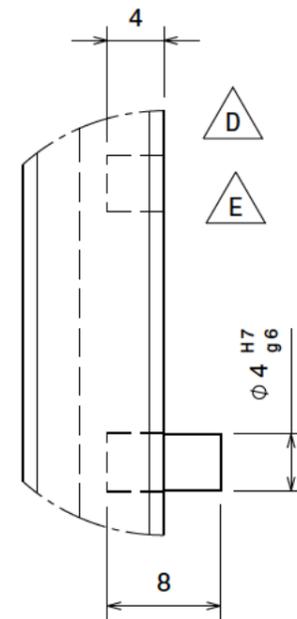
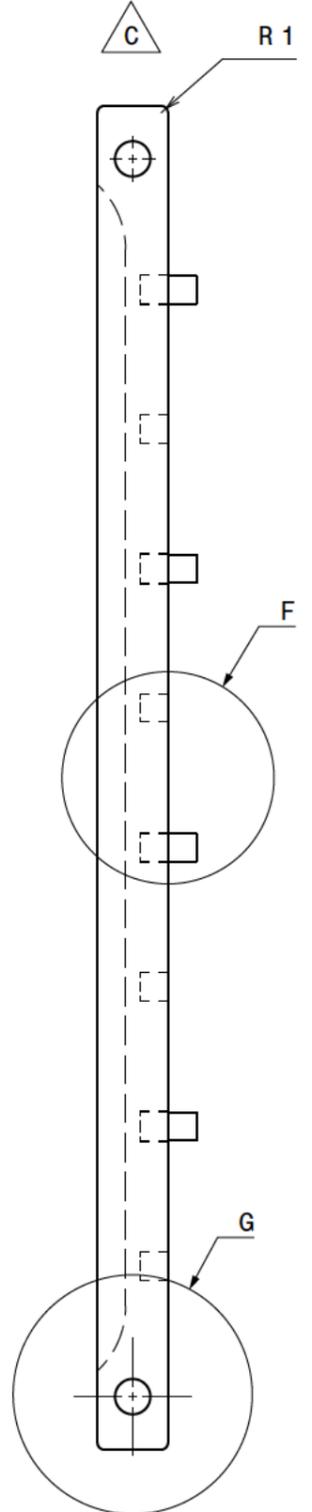
Position: 5 - Steife 5



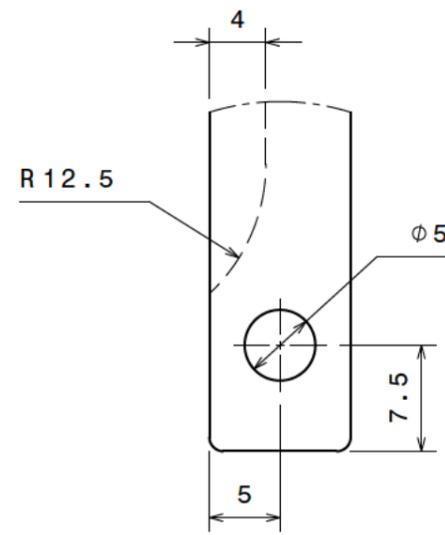
B



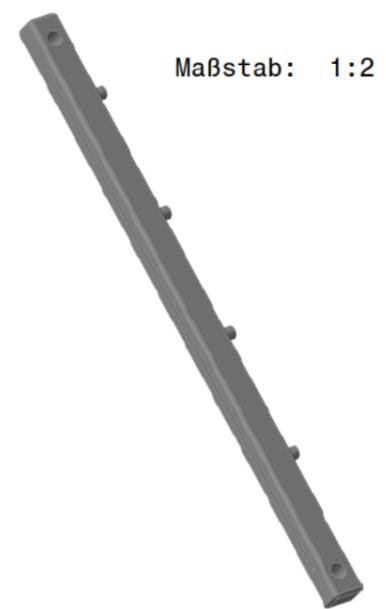
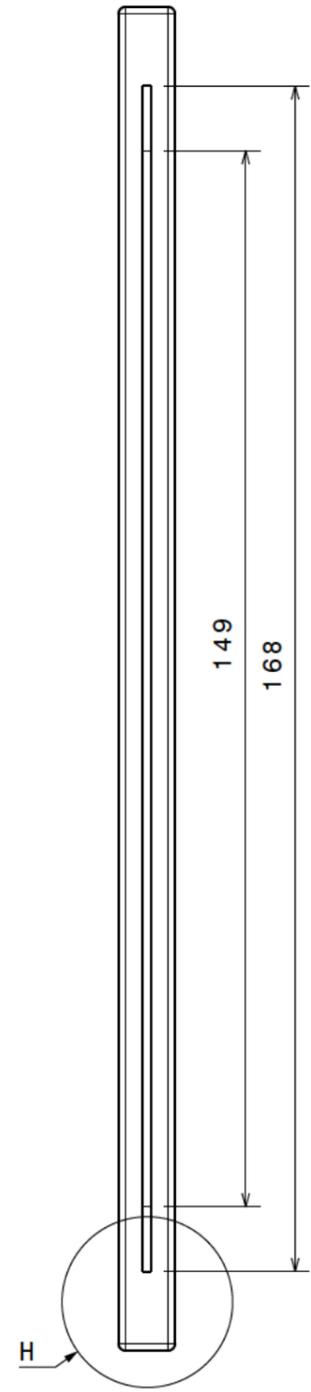
Detail E
Maßstab: 5:1



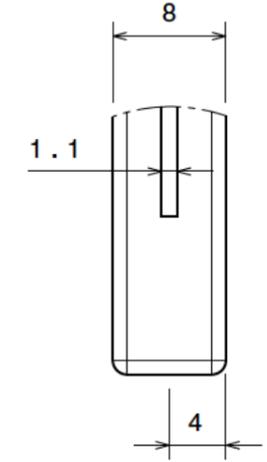
Detail F
Maßstab: 2:1



Detail G
Maßstab: 2:1



Maßstab: 1:2

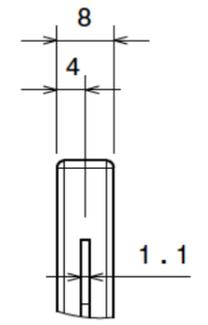
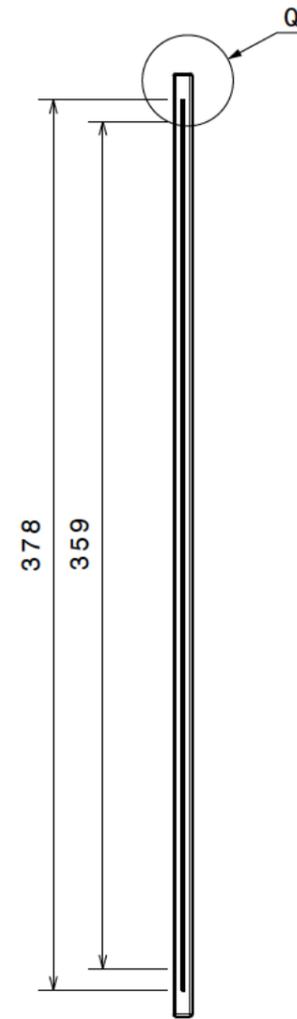
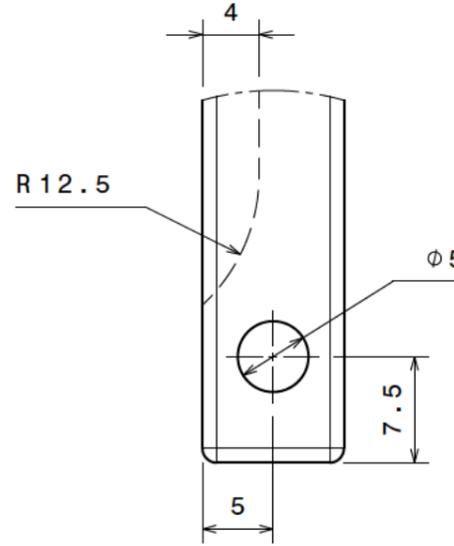
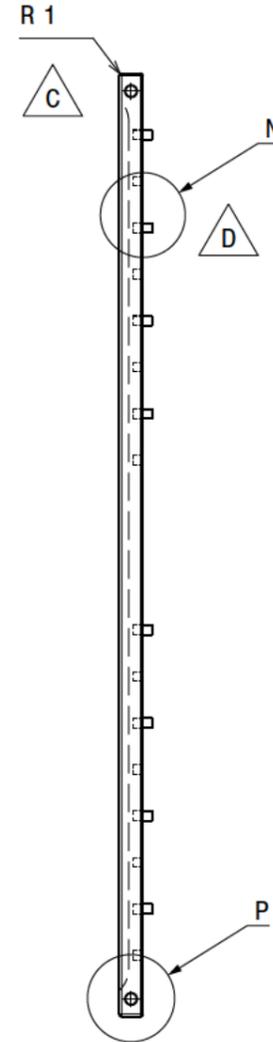
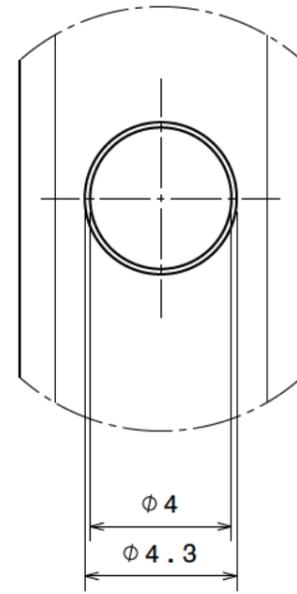
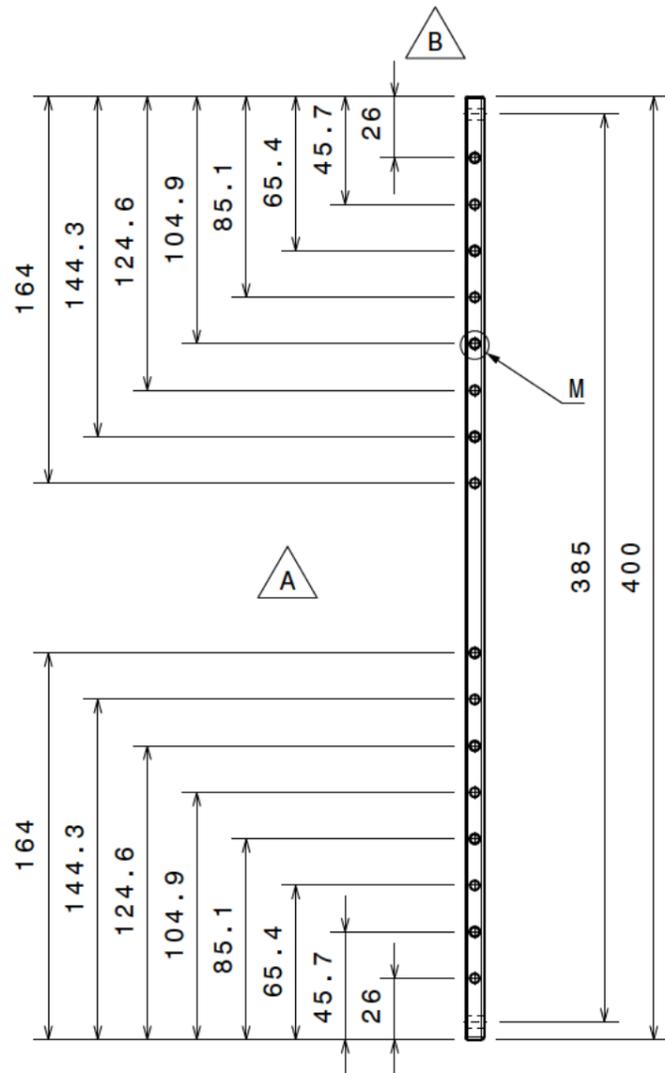


Detail H
Maßstab: 2:1

- A** Die Steifen an den Positionen 3-6 und 9-12 sind identisch.
- B** Befestigungselemente (bestehend aus Stift und Bohrung) werden im Wechsel an die Steifen angebracht.
- D** Radius gilt für alle Ecken
- C** Abstand der Stifte/Bohrungen bleiben gleich.
- E** Stifte in der Bohrung von der Steife eingeklebt mit Loctite 3090.

		Masterarbeit Magdalena Rucinski			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY Magdalena Rucinski		DATE 23.09.2020		Steife 5	
CHECKED BY		DATE		SIZE A3	DRAWING NUMBER N/A
DESIGNED BY Magdalena Rucinski		DATE 21.09.2020		Scale 1:1	WEIGHT(kg) 0,038
				REV 1	SHEET 4/20

Position: 8 - Steife 8



- Steife_7 und Steife_8 bestehen aus den selben Dimensionen.
- Abstand der Stifte/Bohrungen bleiben gleich.
- Radius gilt an allen Ecken
- Befestigungselemente (bestehend aus Stift und Bohrung) werden im Wechsel an die Steife angebracht.
- Stifte in der Bohrung vom Stab eingeklebt mit Loctite 3090.

		Masterarbeit Magdalena Rucinski			
DRAWN BY Magdalena Rucinski		DATE 21.09.2020		DRAWING TITLE Steife 8	
CHECKED BY		DATE		SIZE A3	DRAWING NUMBER N/A
DESIGNED BY Magdalena Rucinski		DATE 21.09.2020		SCALE 1:3	REV 1
		WEIGHT (kg) 0,08		SHEET 5/20	

D

C

B

A

Position: 13 - Trapez Hautfeld

4

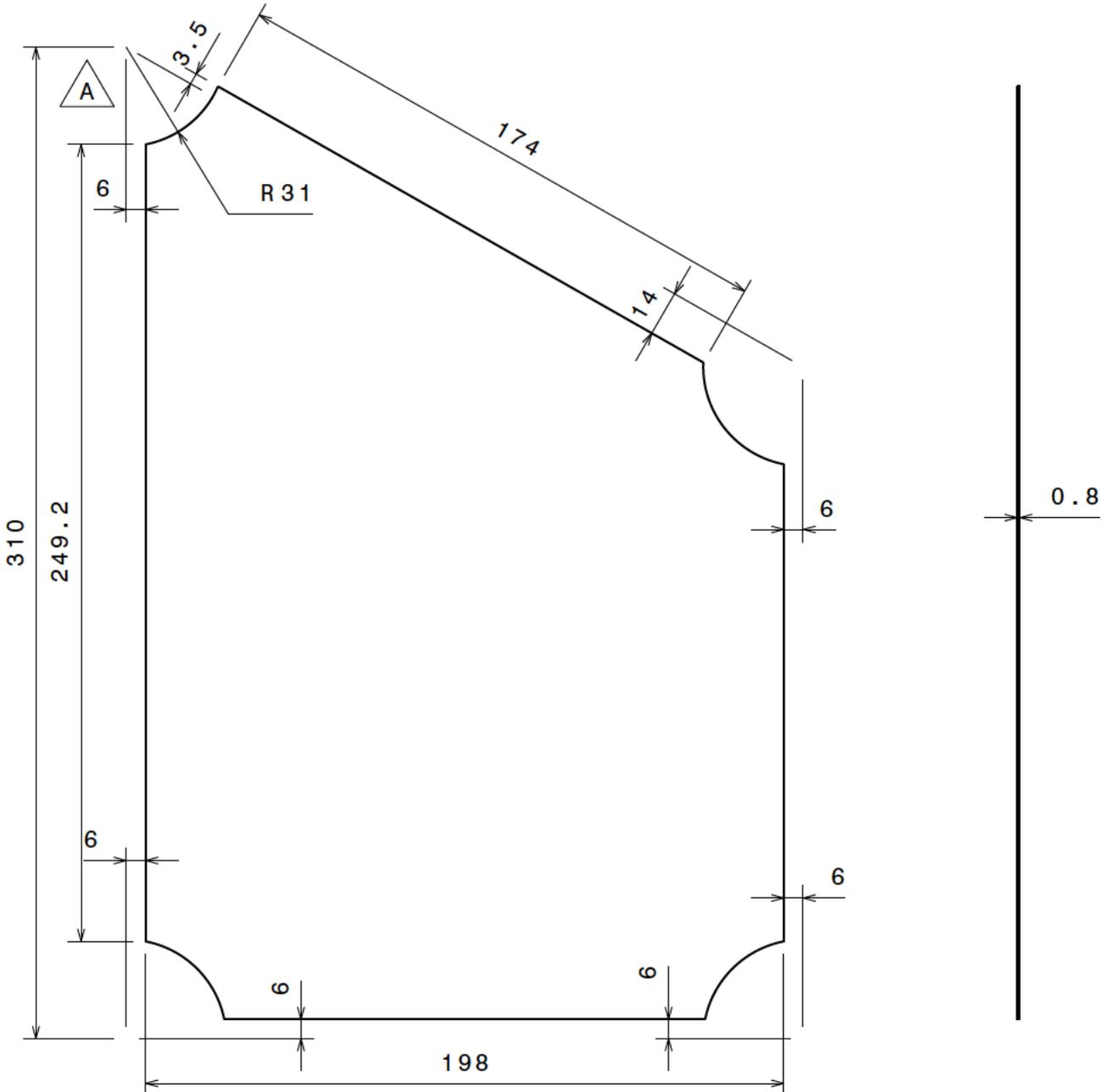
4

3

3

2

2



Radius gilt für alle Ecken



Masterarbeit Magdalena Rucinski

DRAWING TITLE

Hautfeld Trapez

DRAWN BY Magdalena Rucinski	DATE 21.09.2020
--------------------------------	--------------------

CHECKED BY XXX	DATE xxx
-------------------	-------------

DESIGNED BY XXX	DATE xxx
--------------------	-------------

SIZE A4	DRAWING NUMBER N/A	REV 1
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 0,103	SHEET 6/20

D

A

1

1

D

C

B

A

Position: 14 - Quadrat Hautfeld

4

4

3

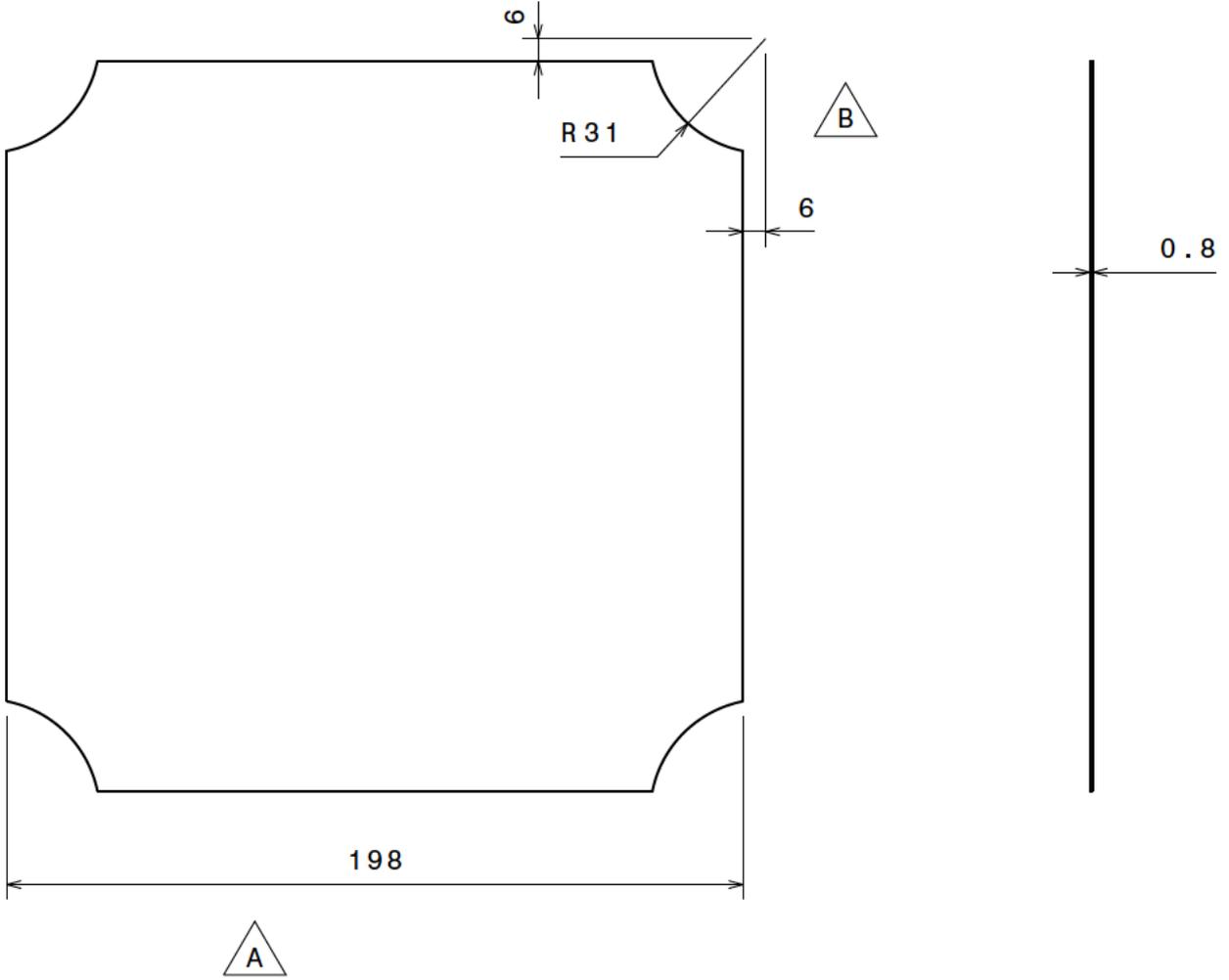
3

2

2

1

1



Quadratisches Hautfeld - alle Seiten sind gleich lang



Radius gilt an allen Ecken des Hautfeldes



Masterarbeit Magdalena Rucinski

DRAWING TITLE

Hautfeld Quadrat

DRAWN BY
Magdalena Rucinski

DATE
21.09.2020

CHECKED BY

DATE

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

N/A

REV
1

DESIGNED BY
Magdalena Rucinski

DATE
21.09.2020

SCALE

1:2

WEIGHT (kg)

0,081

SHEET

7/20

D

A

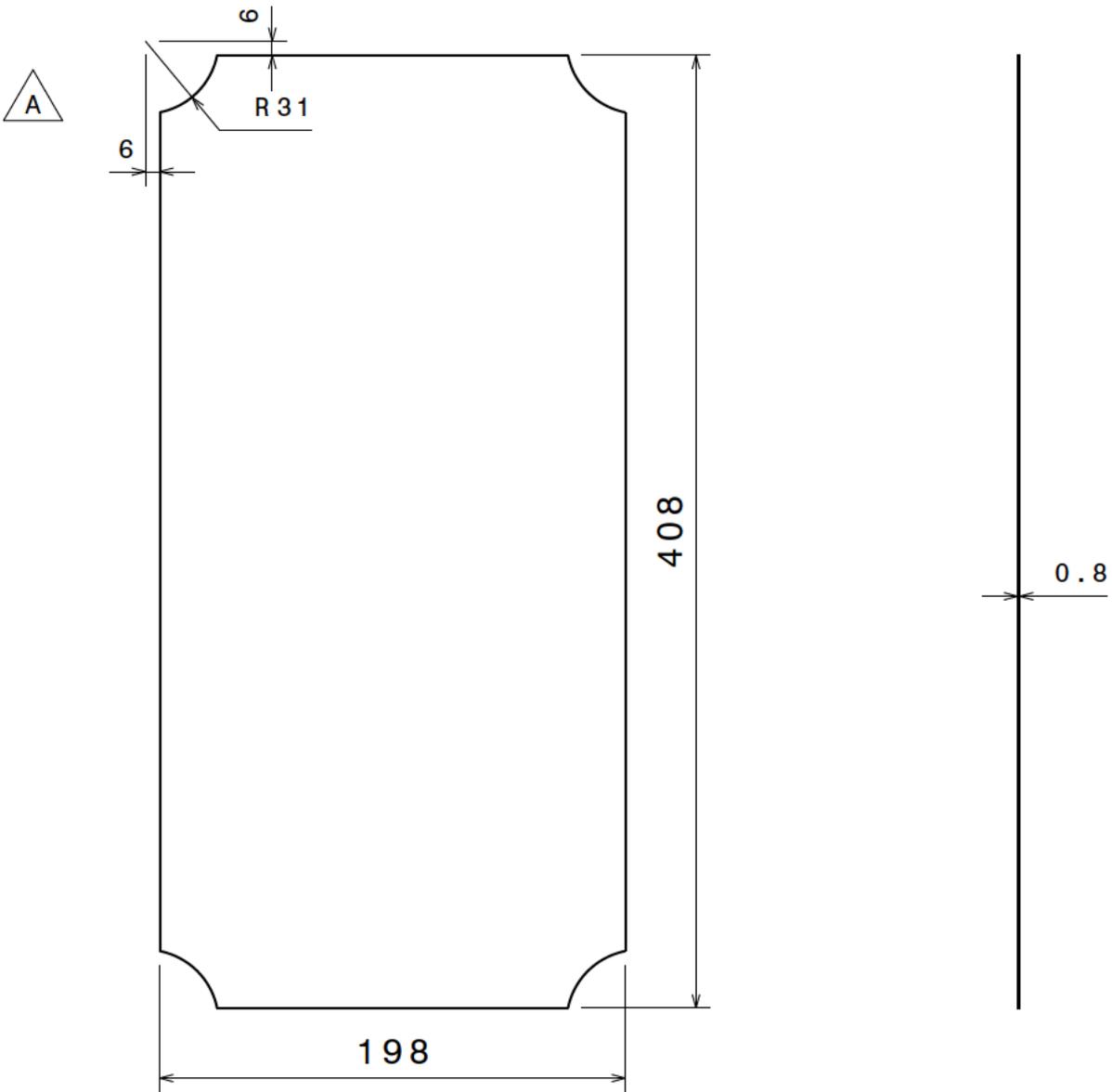
D

C

B

A

Position: 15 - Hautfeld Rechteck



 Radius gilt für alle Ecken



Masterarbeit Magdalena Rucinski XXXXXXXXXX

DRAWING TITLE

Hautfeld Rechteck

DRAWN BY Magdalena Rucinski	DATE 21.09.2020
--------------------------------	--------------------

CHECKED BY	DATE
------------	------

DESIGNED BY Magdalena Rucinski	DATE 21.09.2020
-----------------------------------	--------------------

SIZE A4	DRAWING NUMBER N/A	REV 1
SCALE 1:3	WEIGHT (kg) 0,171	SHEET 8/20

D

A

D

C

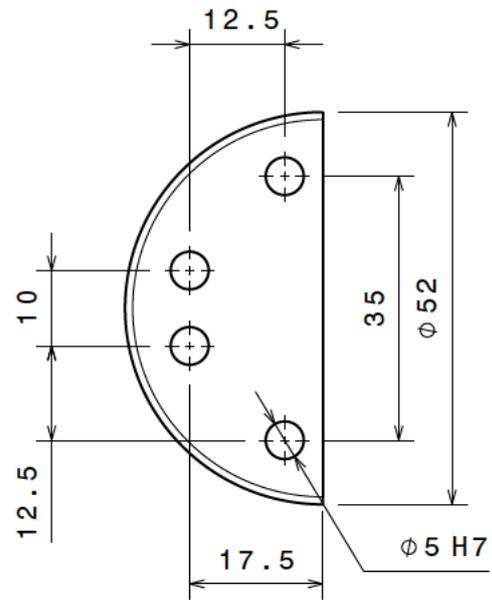
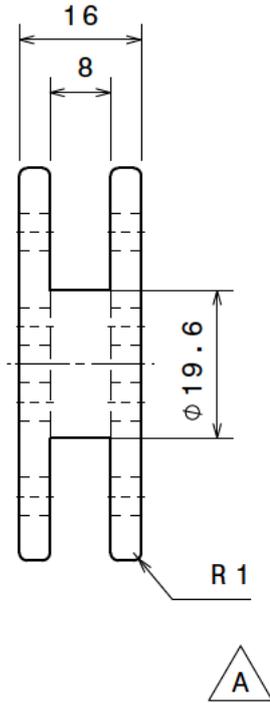
B

A

Position: 23 - Knotenscheibe H



Maßstab: 1:2



Radius gilt für die Vorderseite der Knotenschiebe



Masterarbeit Magdalena Rucinski

DRAWING TITLE

Knotenscheibe H

DRAWN BY Magdalena Rucinski	DATE 24.09.2020
--------------------------------	--------------------

CHECKED BY	DATE
------------	------

SIZE A4	DRAWING NUMBER N/A	REV 1
------------	-----------------------	----------

DESIGNED BY Magdalena Rucinski	DATE 24.09.2020
-----------------------------------	--------------------

Scale: 1:1	WEIGHT(kg) 0,024	SHEET 10/20
------------	------------------	-------------

D

A

D

C

B

A

Position: 40 - Stift

4

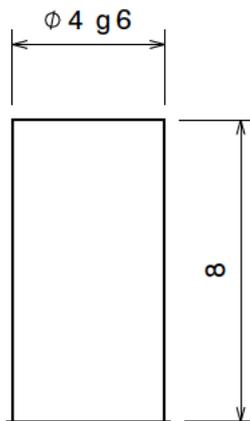
4

3

3

2

2



Alle Stifftte bestehen aus den selben Dimensionen



Masterarbeit Magdalena Rucinski [REDACTED]

DRAWING TITLE

Stift

DRAWN BY
Magdalena Rucinski

DATE
05.10.2020

CHECKED BY

DATE

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
N/A

REV
1

DESIGNED BY
Magdalena Rucinski

DATE
05.10.2020

Scale: 5:1

WEIGHT (kg)

SHEET 11/20

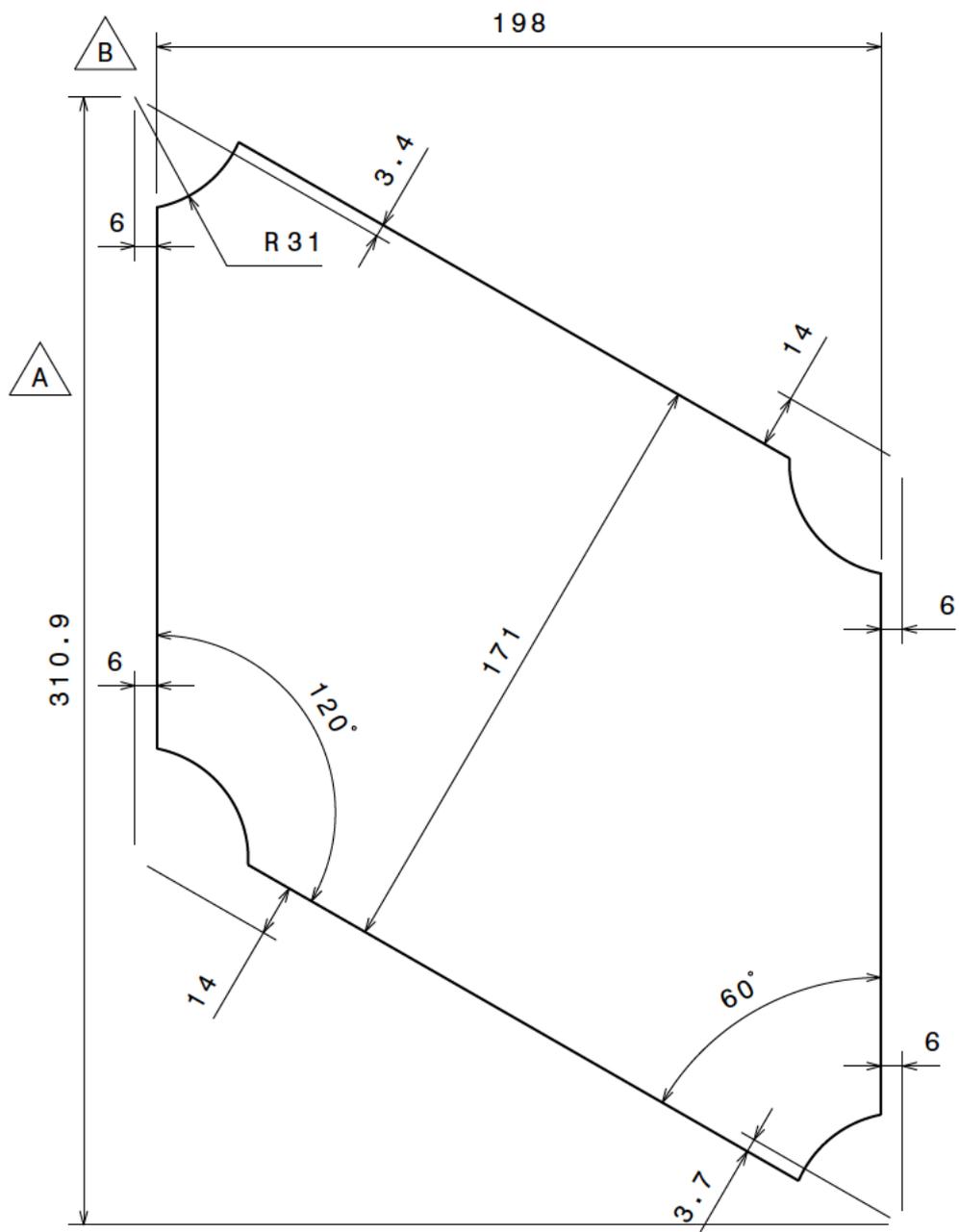
D

A

1

1

Position: 37 - Hautfeld Parallelogramm



-  Alle Bleche in der Nut vom Stab mit Loctite 3090 verklebt.
-  Radius an allen Ecken des Hautfeldes gleich



Masterarbeit Magdalena Rucinski

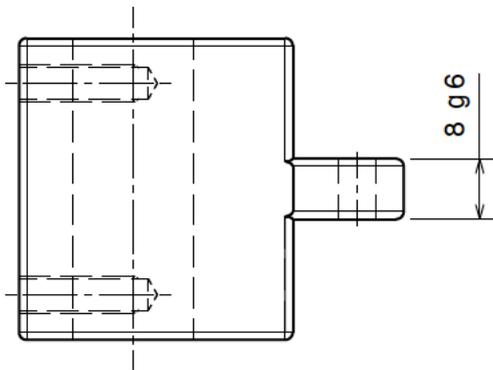
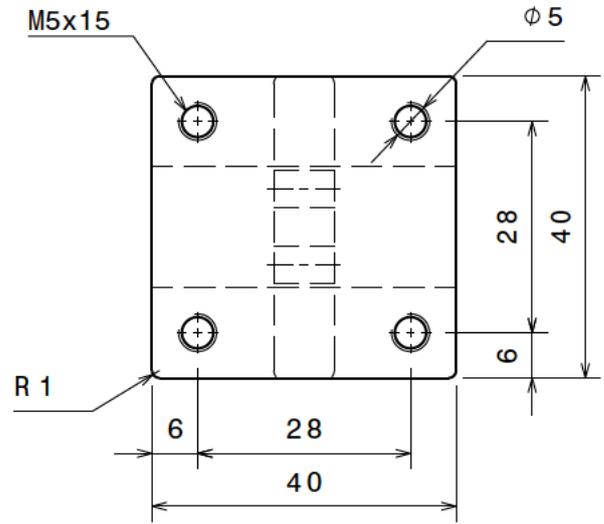
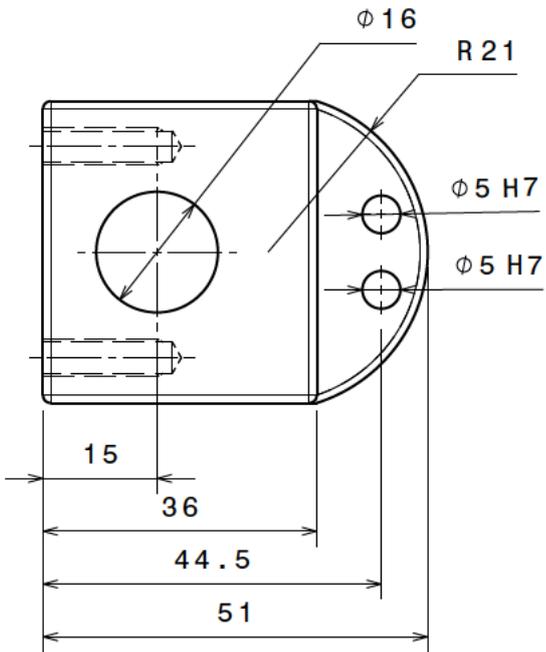
DRAWING TITLE
Hautfeld Parallelogramm

DRAWN BY Magdalena Rucinski	DATE 03.11.2020	DRAWING NUMBER N/A			REV 1
CHECKED BY	DATE	SIZE A4	WEIGHT(kg) 0,081	SHEET 12/20	
DESIGNED BY Magdalena Rucinski	DATE 03.11.2020	Scale: 1:2			

D

A

Position: 56 - Verbindung Lager SFT I



Masterarbeit Magdalena Rucinski

DRAWING TITLE

Verbindung Lager SFT I

DRAWN BY
Magdalena Rucinski

DATE
23.09.2020

CHECKED BY

DATE

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
N/A

REV
1

DESIGNED BY
Magdalena Rucinski

DATE
23.09.2020

Scale: 1:1 WEIGHT(kg) 0,14

SHEET 13/20

D

A

D

C

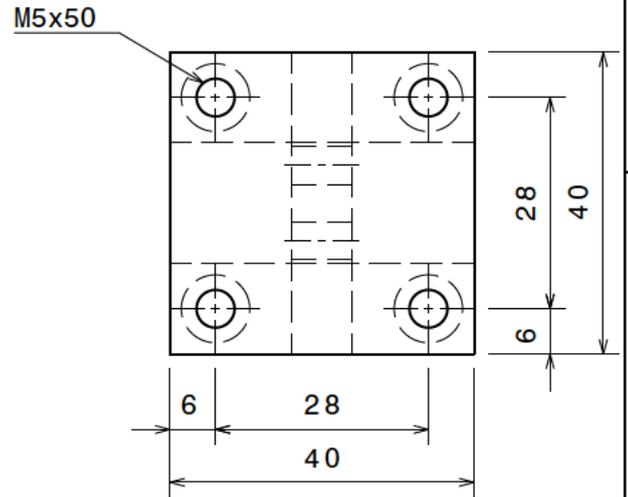
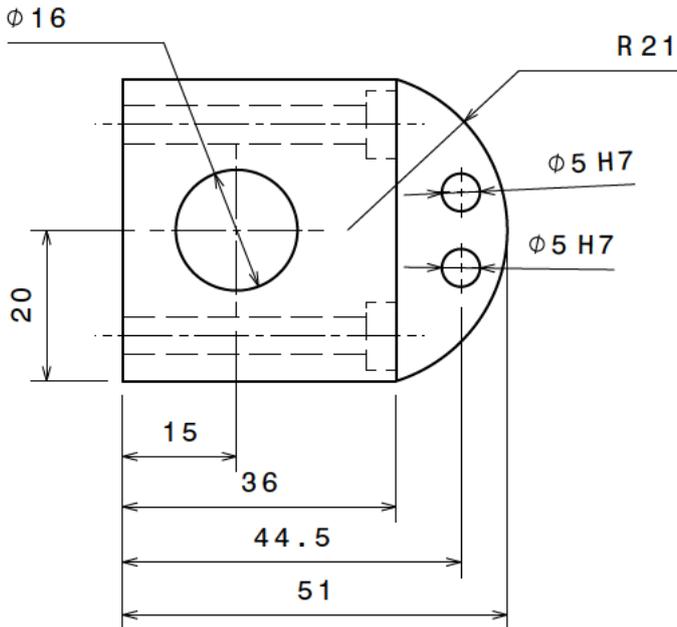
B

A

Position: 51 - Verbindung Lager SFT II

4

4

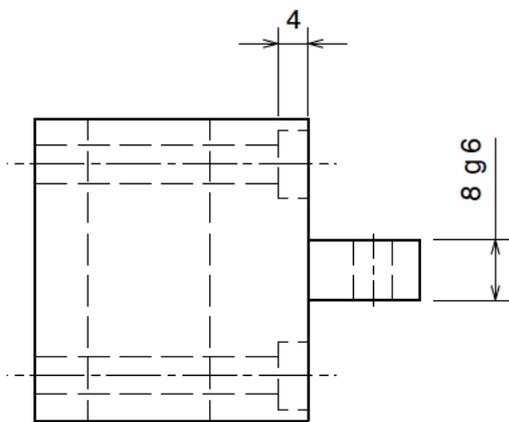


3

3

2

2



1

1



Masterarbeit Magdalena
Rucinski [REDACTED]

DRAWING TITLE

Verbindung Lager SFT II

DRAWN BY
Magdalena Rucinski

DATE
03.11.2020

CHECKED BY

DATE

SIZE A4	DRAWING NUMBER N/A	REV 1
------------	-----------------------	----------

DESIGNED BY
Magdalena Rucinski

DATE
03.11.2020

Scale: 1:1	WEIGHT(kg) 0,133	SHEET 14/20
------------	---------------------	-------------

D

C

B

A

D

C

B

A

Position: 50 - Säule Loslager

4

4

3

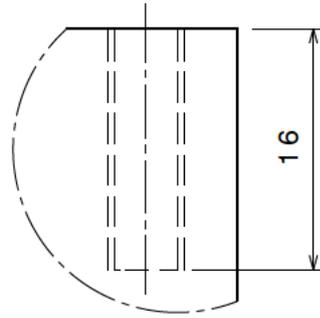
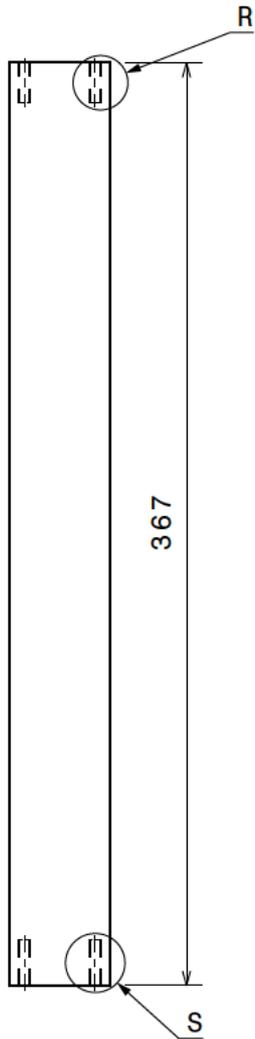
3

2

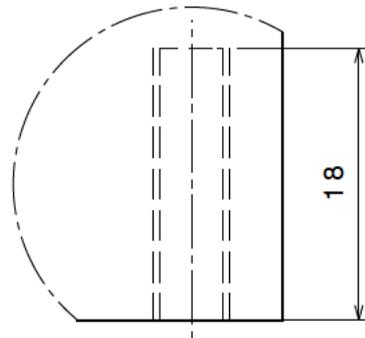
2

1

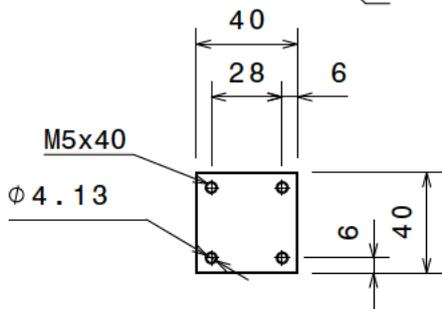
1



Detail R
Maßstab: 2:1



Detail S
Maßstab: 2:1



Masterarbeit Magdalena Rucinski

DRAWING TITLE

Säule (Loslager)

DRAWN BY
Magdalena Rucinski

DATE
04.11.2020

CHECKED BY

DATE

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

N/A

REV
1

DESIGNED BY
Magdalena Rucinski

DATE
04.11.2020

Scale: 1:3

WEIGHT(kg)

1,586

SHEET 15/20

D

A

D

C

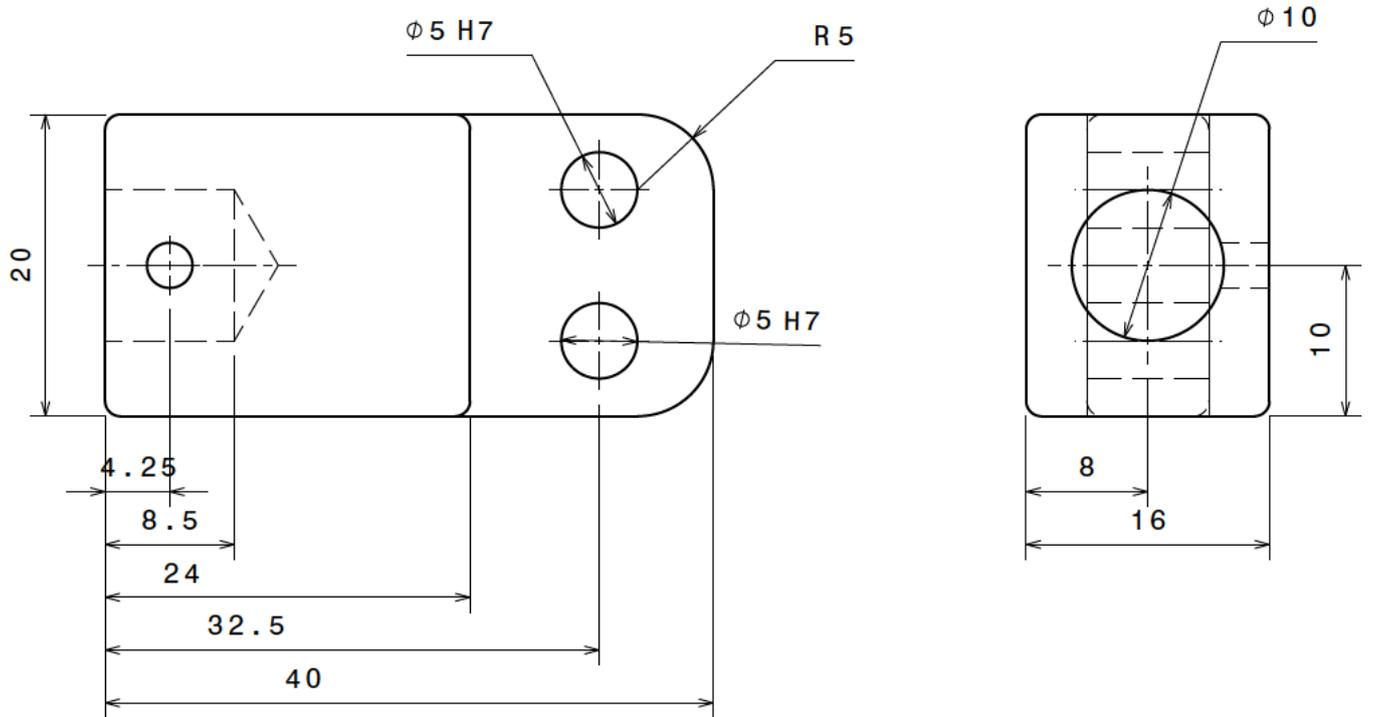
B

A

Position: 55 - Verbindung Kraft

4

4

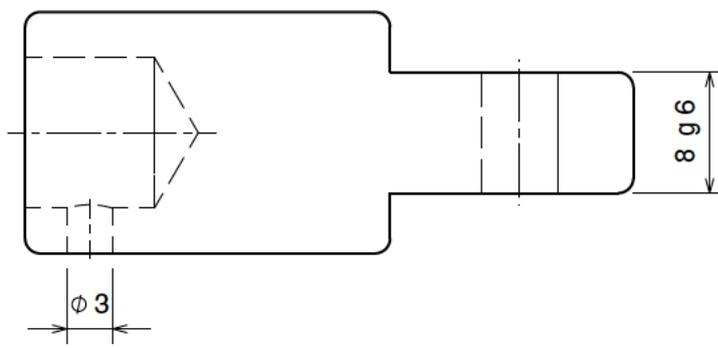


3

3

2

2



Masterarbeit Magdalena
Rucinski [REDACTED]

DRAWING TITLE
Verbindung Kraft

DRAWN BY
Magdalena Rucinski

DATE
04.11.2020

CHECKED BY

DATE

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
N/A

REV
1

DESIGNED BY
Magdalena Rucinski

DATE
04.11.2020

Scale: 2:1

WEIGHT(kg) 0,025

SHEET 16/20

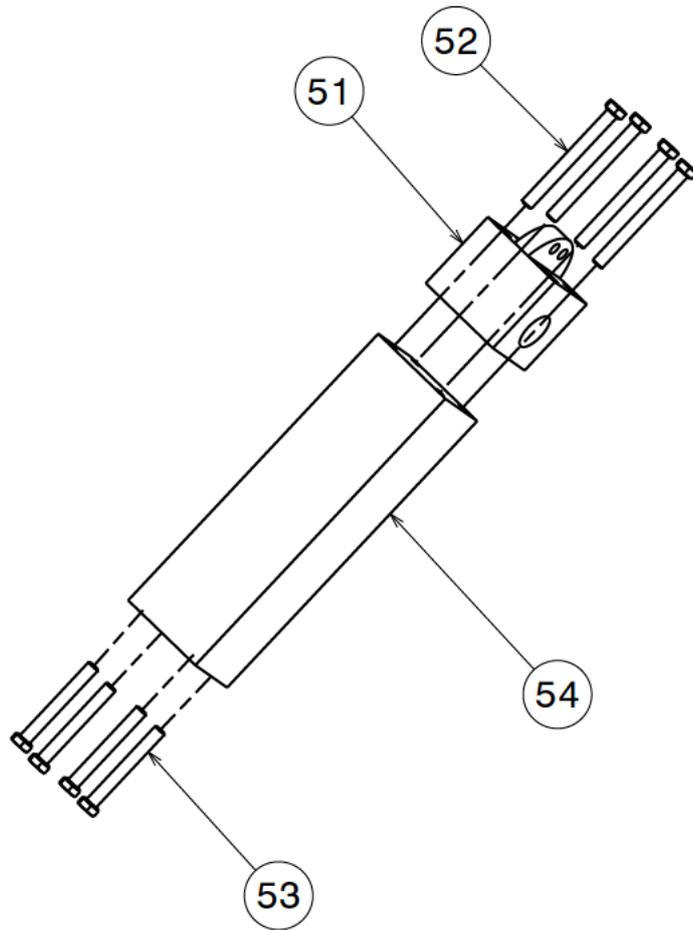
1

1

D

A

Position: [-] - Säule Festlager - Explosionsansicht



Position	Bezeichnung	Material	Anzahl
51	Verbindung Knotenscheibe - Säule	Aluminium	1
52	Sechskantschraube mit Schaft nach DIN 931 - M5x50	Verzinkt	4
53	Sechskantschraube mit Schaft nach DIN 931 - M5x40	Verzinkt	4
54	Säule-Festlager	Aluminium	1



Masterarbeit Magdalena Rucinski

DRAWING TITLE

Explosionsansicht Säule_Festlager

DRAWN BY
Magdalena Rucinski

DATE
03.10.2020

CHECKED BY

DATE

SIZE | DRAWING NUMBER | REV

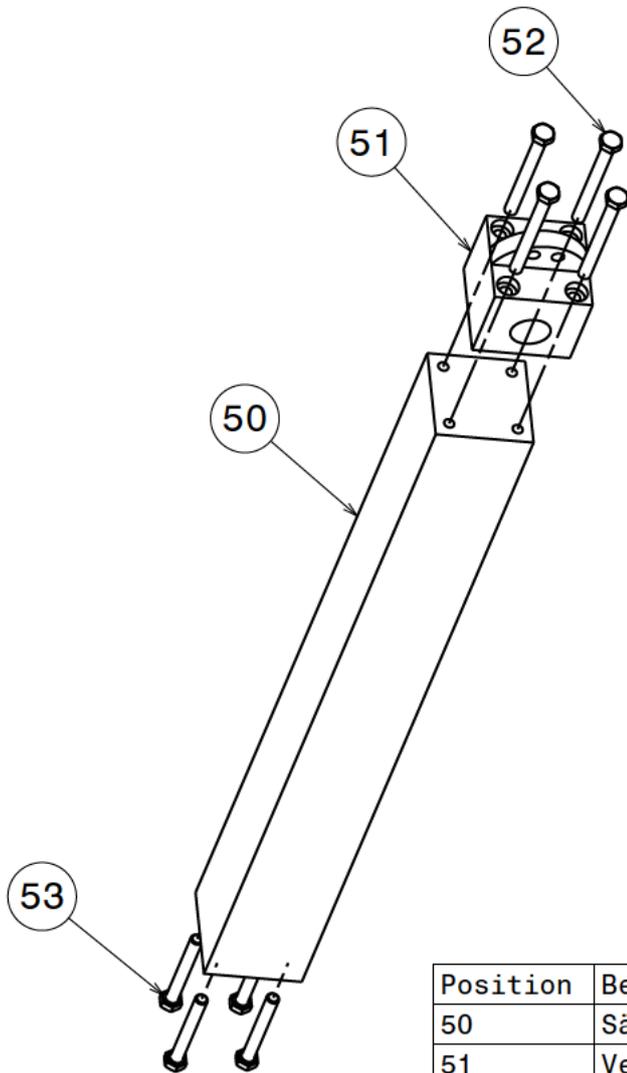
A4 | N/A | 1

DESIGNED BY
Magdalena Rucinski

DATE
03.10.2020

Scale: 1:3 | WEIGHT(kg) 0,624 | SHEET 17/20

Position: [-] - Säule Loslager - Explosionsansicht



Position	Bezeichnung	Material	Anzahl
50	Säule-Loslager	Aluminium	1
51	Verbindung Knotenscheibe - Säule	Aluminium	1
52	Sechskantschraube mit Schaft nach DIN 931 - M5x50	Stahl (Verzinkt)	4
53	Sechskantschraube mit Schaft nach DIN 931 - M5x40	Stahl (Verzinkt)	4



Masterarbeit Magdalena Rucinski

DRAWING TITLE

Explosionsansicht - Säule-Loslager

DRAWN BY
Magdalena Rucinski

DATE
04.11.2020

CHECKED BY

DATE

SIZE A4 DRAWING NUMBER N/A REV 1

DESIGNED BY
Magdalena Rucinski

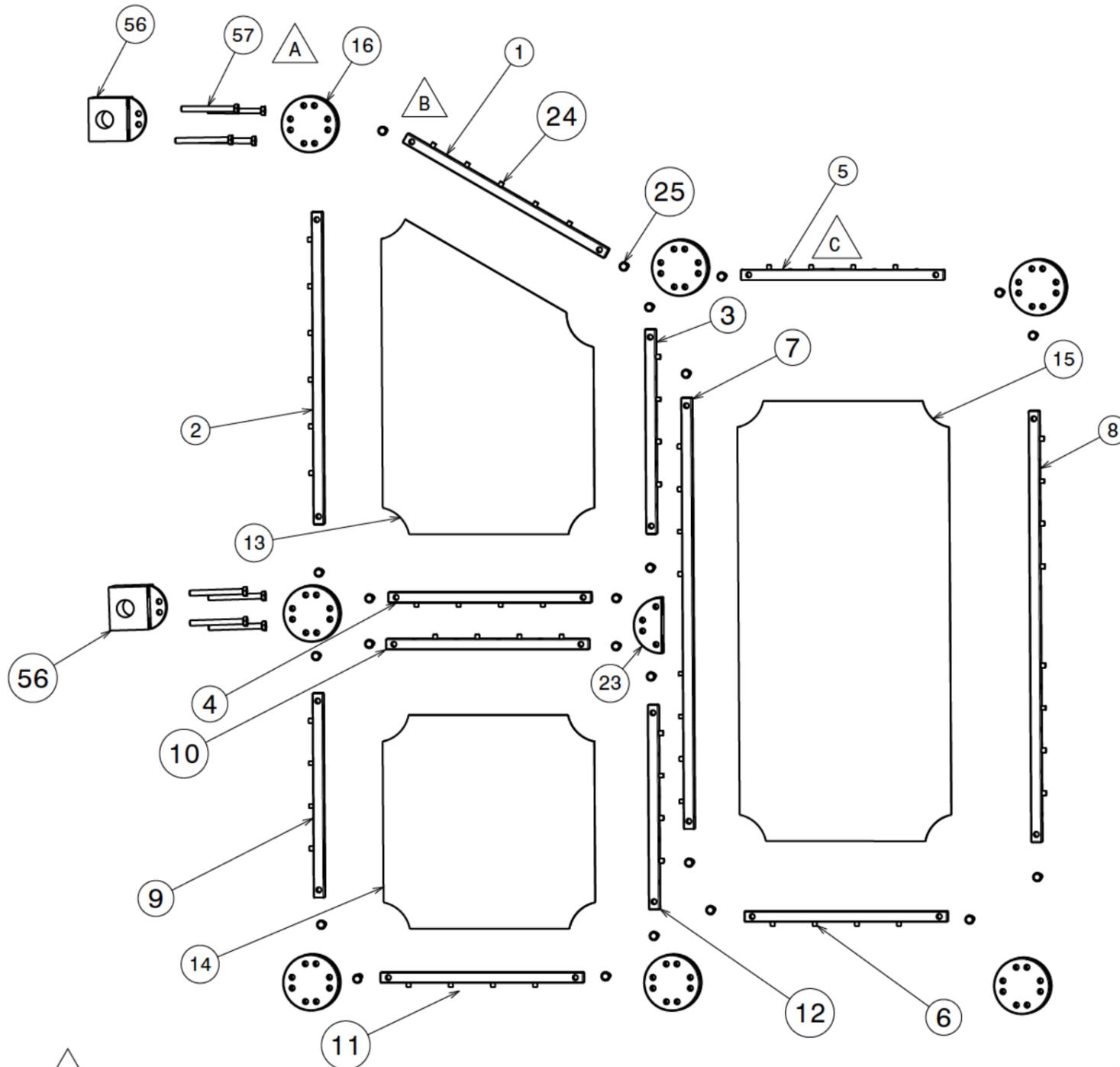
DATE
04.11.2020

Scale: 1:3 WEIGHT(kg) 1,586 SHEET 18/20

D

A

Position: -1 - Schubfeldträger-Modell I - Explosionszeichnung

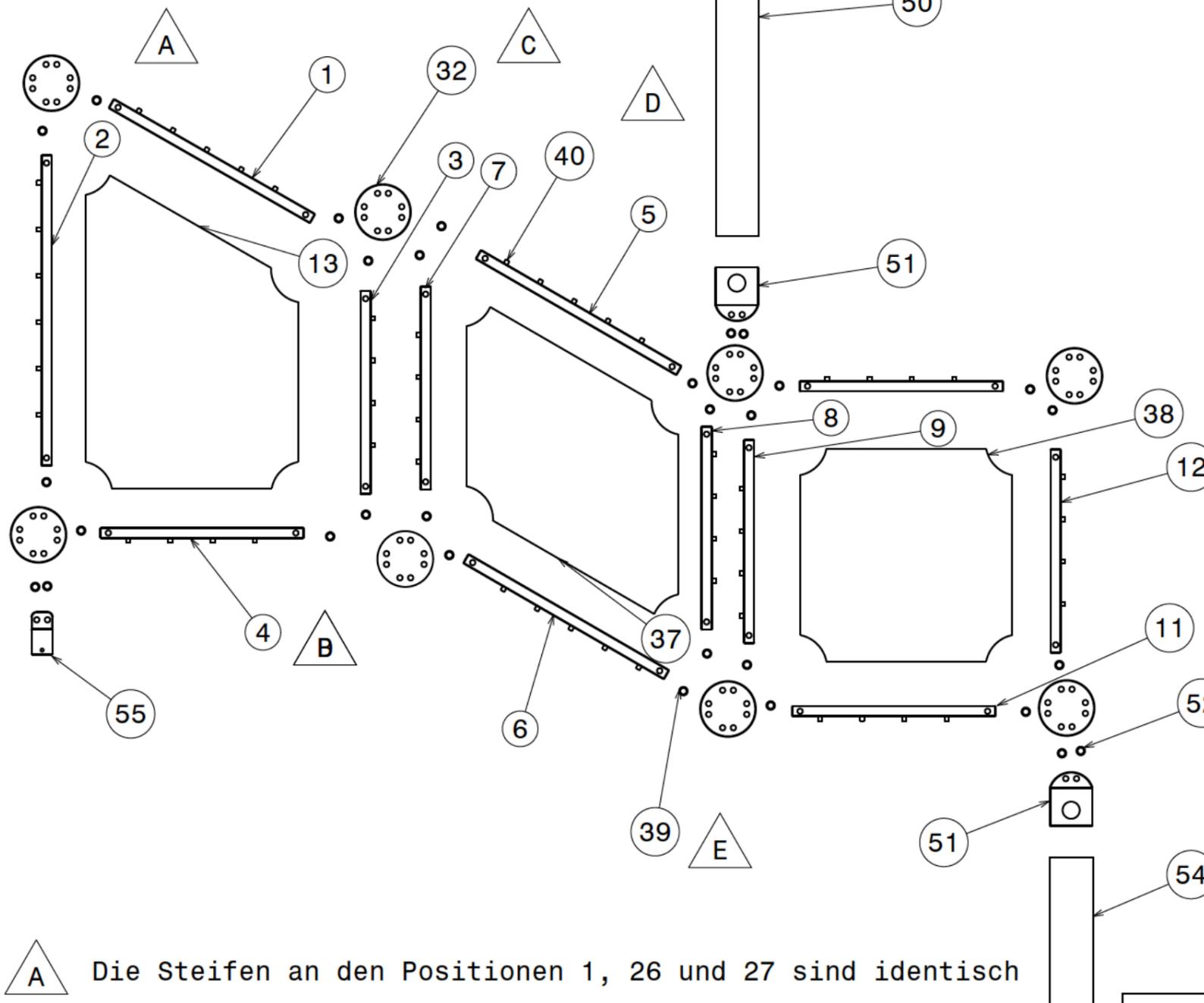


- A** Position 16-22: Knotenscheiben sind identisch.
- B** Position 39: Verbindungselement Bolzen X8CrNiS18-9 nach EN 10088 insgesamt 30Mal
- C** Die Steifen an den Positionen 3-6 und 9-12 sind identisch.
- D** Position 40: Anzahl der Stifte insgesamt 59 Mal
- E** Die Steifen an den Positionen 7 und 8 sind identisch

Position	Bezeichnung	Material	Gewicht	Kommentar
-1	Schubfeldträger Gesamtmodell	Aluminium	1,36kg	
1	Steife 1	Aluminium	0,043kg	
2	Steife 2	Aluminium	0,058kg	
3	Steife 3	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz C
4	Steife 4	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz C
5	Steife 5	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz C
6	Steife 6	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz C
7	Steife 7	Aluminium	0,08kg	Siehe Notiz E
8	Steife 8	Aluminium	0,08kg	Siehe Notiz E
9	Steife 9	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz C
10	Steife 10	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz C
11	Steife 11	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz C
12	Steife 12	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz C
13	Hautfeld Trapez	Aluminium	0,103kg	
14	Hautfeld Quadrat	Aluminium	0,081kg	
15	Hautfeld Rechteck	Aluminium	0,171kg	
16	Knotenscheibe A	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz A
17	Knotenscheibe B	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz A
18	Knotenscheibe C	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz A
19	Knotenscheibe D	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz A
20	Knotenscheibe E	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz A
21	Knotenscheibe F	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz A
22	Knotenscheibe G	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz A
23	Knotenscheibe H	Aluminium	0,024kg	
39	Bolzen X8CrNiS18-9 nach EN10088 (M5x22)	Edelstahl	0,003kg	Siehe Notiz B
40	Stift	Aluminium	-	- Gesamtgewicht der Steifen beziehen die Stifte mit ein - Siehe Notiz D
55	Verbindung Kraft	Aluminium	0,024kg	
56	Verbindung Lager	Aluminium	0,14kg	Benötigt werden 2 Stk.
57	Sechskantschraube DIN 931 M5x15	Stahl (Verzinkt)	0,003kg	Benötigt werden 4 Stk.

		Masterarbeit Magdalena Rucinski		
		DRAWING TITLE Explosionszeichnung Schubfeldträger I		
DRAWN BY Magdalena Rucinski	DATE 23.09.2020	SIZE A3	DRAWING NUMBER N/A	REV 1
CHECKED BY	DATE	Scale 1:5	WEIGHT(kg) 3,133	SHEET 19/20
DESIGNED BY Magdalena Rucinski	DATE 23.09.2020			

Position: [-] - Schubfeldträger
Explosionszeichnung



Position	Bezeichnung	Material	Gewicht	Kommentar
1	Steife 1	Aluminium	0,043kg	Siehe Notiz A
2	Steife 2	Aluminium	0,058kg	
3	Steife 3	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz B
4	Steife 4	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz B
13	Hautfeld Trapez	Aluminium	0,103kg	
16	Knotenscheibe A	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz C
17	Knotenscheibe B	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz C
22	Knotenscheibe G	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz C
24	Steife 5	Aluminium	0,043kg	Siehe Notiz A
25	Steife 6	Aluminium	0,043kg	Siehe Notiz A
26	Steife 7	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz B
27	Steife 8	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz B
28	Steife 9	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz B
29	Steife 10	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz B
30	Steife 11	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz B
31	Steife 12	Aluminium	0,038kg	Siehe Notiz B
32	SFT II Knotenscheibe I	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz C
33	SFT II Knotenscheibe J	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz C
34	SFT II Knotenscheibe K	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz C
35	SFT II Knotenscheibe L	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz C
36	SFT II Knotenscheibe M	Aluminium	0,049kg	Siehe Notiz C
37	SFT II Parallelogramm	Aluminium	0,081kg	
38	SFT II Hautfeld Quadrat	Aluminium	0,081kg	Selbe Dimensionen wie beim SFT I
39	Bolzen X8CrNiS18-9 nach EN10088 (M5x22)	Edelstahl	0,003kg	Benötigt werden 30 Stk.
40	Stift	Aluminium	-	Gewicht der Steifen beziehen die Stifte mit ein
50	Säule Loslager	Aluminium	1,586kg	
51	Verbindung Knotenscheibe - Säule	Aluminium	0,133kg	Benötigt werden 2 Stk.
52	Sechskantschraube mit Schaft nach DIN 931 M5x50	Stahl (Verzinkt)	0,009kg	Benötigt werden 4 Stk.
53	Sechskantschraube mit Schaft nach DIN 931 M5x40	Stahl (Verzinkt)	0,008kg	Benötigt werden 4 Stk.
54	Säule Festlager	Aluminium	0,624kg	
55	Verbindung Kraft	Aluminium	0,025kg	

- A** Die Steifen an den Positionen 1, 26 und 27 sind identisch
- B** Die Steifen an den Positionen 3, 4, 24,25 und 28-31 sind identisch.
- C** Position 16, 17, 22 und 32-36: Knotenscheiben sind identisch.
- D** Position 40: Stift insgesamt 53 Mal
- E** Position 39: Verbindungselement Bolzen X8CrNiS18-9 nach EN 10088 insgesamt 30 Mal

		Masterarbeit Magdalena Rucinski		
		DRAWING TITLE		
DRAWN BY Magdalena Rucinski	DATE 30.10.2020	Explosionsansicht Schubfeldträger II		
CHECKED BY	DATE	SIZE A3	DRAWING NUMBER N/A	REV 1
DESIGNED BY Magdalena Rucinski	DATE 30.10.2020	Scale: 1:5	WEIGHT(kg) 3,81kg	SHEET 20/20

Anhang B – Datenblatt – Bolzen aus Edelstahl X8CrNiS18-9



Beschreibung:

Der Werkstoff 1.4305 ist ein austenitischer Chrom-Nickel-Stahl mit Schwefelzusatz. Durch den Legierungszusatz eignet sich diese Güte besonders für die spanende Bearbeitung auf Automaten.

Eigenschaften:

sehr gute Zerspanbarkeit, mittlere Korrosionsbeständigkeit, schlechte Polierbarkeit, schlechte Schweißbarkeit

Chemische Zusammensetzung (Massenanteil in % nach DIN EN 10088-3)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	N	Ni
min.	-	-	-	-	0,150	17,00	-	-	8,00
max	0,10	1,00	2,00	0,045	0,350	19,00	1,00	0,110	10,00

Normen und Bezeichnungen

DIN EN 10088	1.4305 X8CrNiS18-9
AISI	303
UNS	S30300
B.S.	303S31
JIS	SUS303
AFNOR	Z8CNF18-09
SS	2346
UNE	F.310.C

Anwendungsgebiete

- Automobilindustrie
- Lebensmittelindustrie
- Maschinenbau
- Elektronische Ausrüstung
- Chemie, Petrochemie
- Armaturenbau
- Architektur & Dekoration

Wichtiger Hinweis:

Die Angaben über die Beschaffenheit oder Verwendbarkeit von Materialien bzw. Erzeugnissen dienen ausschließlich der Information und stellen keine vertragliche Verpflichtung dar. Die Angaben entsprechen lediglich den Erfahrungen der Hersteller und HSM®.
Alle Angaben sind ohne Gewähr. Druckfehler, Irrtümer und Änderungen vorbehalten.



Mechanische Eigenschaften bei 20° C (Zustand lösungsgeglüht)

Härte HB 30	Dehngrenze Rp0,2%	Zugfestigkeit Rm	Dehnung A5,65	Elastizitätsmodul
≤ 230 HB	≥ 190 N / mm ²	500 - 750 N / mm ²	≥ 35 %	200 kN / mm ²

Physikalische Eigenschaften bei 20° C

Dichte	Spezifische Wärme	Wärmeleitfähigkeit	Elektrischer Widerstand	Magnetisierbarkeit
7,90 kg/dm ³	500 J/kg K	15 W/m K	0,73 (ohm) mm ² /m	sehr gering

Schweißbarkeit

WIG-Schweißen	ungeeignet
MAG Massiv-Draht	ungeeignet
Lichtbogenschweißen	ungeeignet
UP-Schweißen	ungeeignet
Laserstrahlschweißen	ungeeignet
Gasschmelzschweißen	ungeeignet

1.4305 sollte wegen dem hohen Schwefelgehalt nicht geschweißt werden. Beim Schweißen würden Heißrisse entstehen.

Thermische Behandlung

Warmformgebung	900 - 1200 °C
Lösungsglühen	1000 - 1100 °C

Lieferformen:

Stäbe 

Bleche 

Profile 

Drähte, Fittings, Schmiede-/Gussstücke, Bandstahl, Blech-/ Blockzuschnitte,
 Fertigteile nach Zeichnung

Wichtiger Hinweis:

Die Angaben über die Beschaffenheit oder Verwendbarkeit von Materialien bzw. Erzeugnissen dienen ausschließlich der Information und stellen keine vertragliche Verpflichtung dar. Die Angaben entsprechen lediglich den Erfahrungen der Hersteller und HSM[®].
 Alle Angaben sind ohne Gewähr. Druckfehler, Irrtümer und Änderungen vorbehalten.

Anhang C – Datenblatt – Kleber LOCTITE 3090

LOCTITE® 3090™

September 2012

PRODUKTBECHREIBUNG

LOCTITE® 3090™ besitzt die folgenden Produkteigenschaften:

Technologie	Cyanacrylat
Chemische Basis	Ethyl-Cyanacrylat
Farbe (Komp. A)	Klar bis leicht trüb gelförmig ^{LMS}
Farbe (Komp. B)	Transparent, farblos, flüssig
Farbe (Mischung A+B)	Klar bis leicht trüb gelförmig
Komponenten	Zwei Komponenten - Mischen erforderlich
Viskosität	Thixotropes Gel
Aushärtung	Aushärtung nach dem Mischen von zwei Komponenten
Anwendung	Kleben

LOCTITE® 3090™ ist ein zweikomponentiger, schnell härtender, spaltfüllender Klebstoff, der hervorragende Haftfestigkeiten auf vielen verschiedenen Werkstoffen erzielt, u.a. auf Kunststoffen, Gummi und Metall. LOCTITE® 3090™ wird zum Verbinden von Teilen mit unterschiedlichen oder undefinierten Klebspalten (bis 5mm) oder für Anwendungen eingesetzt, wo Klebstoffüberschüsse vollständig aushärten müssen. Die gelförmige Konsistenz verhindert Abfließen selbst auf senkrechten Flächen. LOCTITE® 3090™ eignet sich auch zum Kleben von porösen Materialien wie Holz, Papier, Leder und Textilien.

MATERIALEIGENSCHAFTEN

Komponente A:

Spez. Dichte bei 25 °C	1,1
Flammpunkt - siehe Sicherheitsdatenblatt	
Casson-Viskosität, 25 °C, mPa·s (cP): Kegel-Platte-Rheometer	150 bis 450 ^{LMS}

Komponente B:

Casson-Viskosität, 25 °C, mPa·s (cP): Kegel-Platte-Rheometer	10 bis 30
Flammpunkt - siehe Sicherheitsdatenblatt	

Mischung:

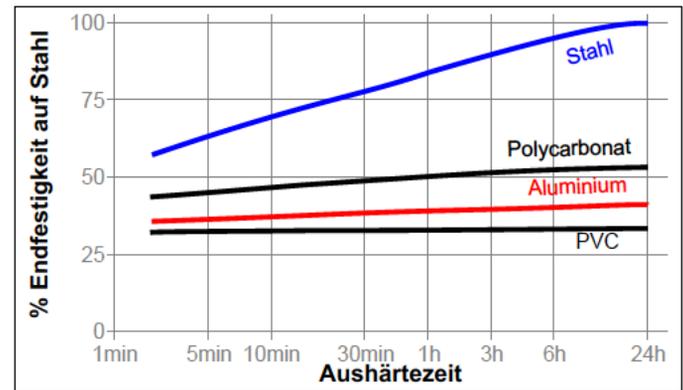
Offene Zeit bei 25 °C, Sekunden	90 bis 180
---------------------------------	------------

TYPISCHE AUSHÄRTEEIGENSCHAFTEN

Die Aushärtung wird durch Mischen der Komponenten A und B ausgelöst. Handfestigkeit wird schnell erreicht, Funktionsfestigkeit innerhalb von 24 Stunden.

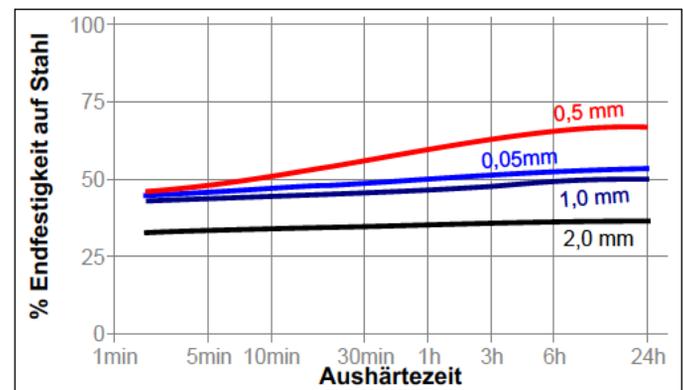
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Material

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der verwendeten Materialoberfläche. Das untenstehende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit auf Zugscherproben aus Stahl verglichen mit anderen Materialien. Geprüft gemäß ISO 4587.



Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Spalt

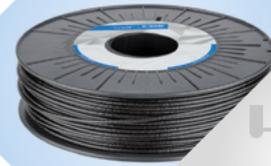
Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig vom Klebspalt. Das untenstehende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit auf Zugscherproben aus Polycarbonat bei unterschiedlichen Spalten. Geprüft gemäß ISO 4587.



Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der Umgebungstemperatur. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei Zugscherproben aus Polycarbonat bei unterschiedlichen Temperaturen. Geprüft gemäß ISO 4587.

Anhang D – Datenblatt - Ultrafuse PLA PRO1



Ultrafuse® PLA PRO1

Speed – Strength – Versatility and Consistency

Ultrafuse® PLA PRO1 is developed as a high-speed engineering thermoplastic that prints as easy as PLA, at speeds previously considered unusable. Yet it retains far better mechanical properties, that even exceed printed ABS objects. Something that the most demanding users have always had to make a compromise on prior to Ultrafuse® PLA PRO1.

By varying the print settings, users can optimize for speed, strength, surface quality or a mix of those qualities beyond performance levels of traditional filaments. When you find yourself in an environment that requires reliable performance print after print, look no further than to increase your productivity with Ultrafuse® PLA PRO1. By cranking up the speed you can save at least 30%* in printing time. To achieve this high speed, we recommend setting your printer in the temperature range of 220°C to 230°C*. Superfast printing may affect surface quality. Ultrafuse® PLA PRO1 has strong layer adhesion which makes prints much stronger, thus increasing functionality.

* Results may differ due to the mechanical properties of the 3D-printer

Benefits at a Glance

- Speed: Reduce your printing time by 30% – 80%, (subject to printer/ object limitations)
- Strength: Excels overall beyond printed ABS in mechanical properties
- Versatility: One filament that can be tuned towards blazing speed and excellent surface finish
- Consistency: Truly consistent filament, also between colors and batches, it will perform as expected, every time

Applications

- Jigs & fixtures
- Prototyping

Material Properties

Tensile strength (MPa)	21.8 (z-x), 48 (x-y)
Flexural modulus (MPa)	2340 (x-z), 2823 (x-y)
Elongation (break)	0.9 % (z-x), 21.9 % (x-y)



Print Settings

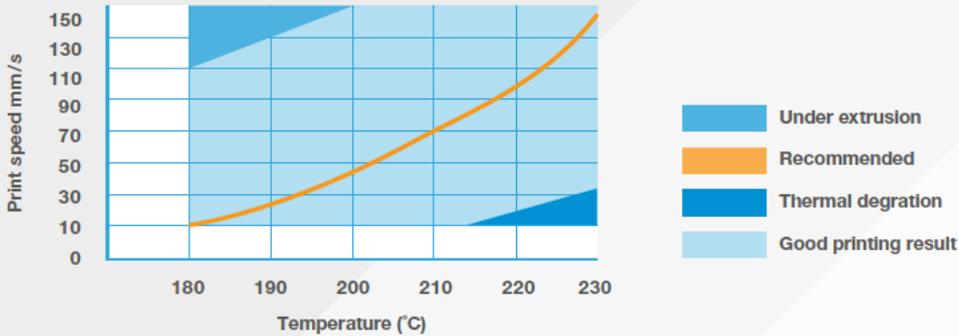


Fast Print Settings (10 Hours)	
Nozzle temperature	220 °C ± 10 °C
Print speed	120 – 150 mm/s
Bed temperature	60 °C or non-heated bed with tape/ glue
Fill density	density ≥ 20% (higher = stronger)
Bed modification	No, clean glass
Fan speed	100%
Top/Bottom thickness	1.2 mm (thicker = stronger)
Layer Height	0.1 mm

Strong Settings (26 Hours)	
Nozzle temperature	220 °C ± 10 °C
Print speed	40 – 70 mm/s
Bed temperature	60 °C or non-heated bed with tape/ glue
Fill density	density ≥ 20% (higher = stronger)
Bed modification	No, clean glass
Fan speed	0%
Top/Bottom thickness	1.2 mm (thicker = stronger)
Layer Height	≤ 0.06 mm (smaller = stronger)

Aesthetics Settings (26 Hours)	
Nozzle temperature	210 °C ± 10 °C
Print speed	≤ 70 mm/s
Bed temperature	60 °C or non-heated bed with tape/ glue
Fill density	density ≥ 20% (higher = stronger)
Bed modification	No, clean glass
Fan speed	100%
Top/Bottom thickness	1.2 mm (thicker = stronger)
Layer Height	0.1 mm (smaller = better)

Speed vs Temperature



Anhang E – Erklärung zur Selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Rucinski

Vorname: Magdalena

dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema:

Konstruktion und Auslegung eines Versuchstandes zur experimentellen Analyse am ebenen Schubfeldträger

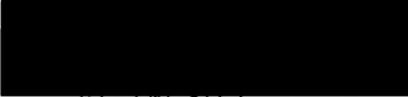
ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg

Ort

26.11.2020

Datum


Unterschrift im Original